

(美)

B. 罗菲尔

J. E. 里金斯多普

著

过程动态学、 控制与保护

科学出版社

过程动态学、控制与保护

6

〔美〕B. 罗菲尔 J. E. 黑金斯多普 著

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

现代控制理论是当前发展很快,应用很广的科学技术领域之一。本书比较系统地阐述了过程动态学、建立数模的方法、方程求解的条件与技巧以及调节系统和过程保护等问题。书中还举了许多化工实例,并详细地介绍了它们的求解过程。

本书可供从事化工过程设计、研究和操作的人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

B Raffel J E. Rajhsdorff
PROCESS DYNAMICS CONTROL AND PROTECTION
Ann Arbor Science Publishers
1982

过程动态学、控制与保护

[美] B 罗菲尔 J E 里金斯多普 著

王 晖 等 译

责任编辑 张英娥

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1992 年 12 月第一次印刷 印张 12 1/2

印数: 1—850 字数: 277 000

ISBN 7-03-002062-6/O · 389

定价: 11.70 元

译 序

虽然现代控制理论是当前发展最快、成果最多的科学技术领域之一，但在化工过程中的应用至今依然进展缓慢。其原因主要是化工对象十分复杂：如本质非线性、纯滞后大、变量数多、物料与能量流程闭合交叉、时变、分布参数以及随机行为等等。因此，只有将过程特性、数学模型和控制问题当成一个整体才能解决化工过程的控制问题。由于有关对象的知识来自对对象理化过程本身的探讨，所以控制工程与化学工程人员的通力合作是必不可少的，而要做到这一点，首先必须建立共同的技术语言。在这方面，本书作出了值得肯定的贡献。

全书共十九章，主要介绍过程动态学，并以此为基础，论及建模方法、方程求解、调节系统与过程保护。本书的特点是工程观点与针对性较强，既可作为大专院校有关专业的教材，又可作为有关工程技术人员的参考资料。

参加本书翻译工作的有王晖(前言、第五、六、七、十三、十九章)、潘立登(第九、十一、十六、十七章)、龚剑平(第八、十二、十四、十八章)、吴重光(第三、四、十、十五章)、曹柳林(第一、二章)、尤勇(附录及索引)。全稿由王晖、沈承林整理，宋心琦校订。

由于译者水平所限，译文难免有不妥之处，希读者指正。

前 言

在科学技术领域中,用模型来描述实际系统是很普遍的。模型可以有不同的类型,既可以表现为能量、物料或信息流的关系式,也可以表现为事物的因果关系。后一种模型有多方面的用途,其中包括:

- 1.了解实际系统的行为。
- 2.确定实际系统对外界作用的敏感性。
- 3.分析实际系统的稳定性。
- 4.推测实际系统的后续行为。
- 5.研究实际系统的可控性。
- 6.设计调节系统。
- 7.设计保护系统。

大多数教科书在讨论因果模型及其应用时,用的是拉普拉斯变换、频域等专门的数学方法,对从事系统控制的工程师和正在学习控制工程的学生而言,显然是比较容易接受的。可是对于大部分化学工程师和学习化学工程的学生来说,他们对于控制理论的兴趣毕竟是第二位的,所以用他们熟悉并经常运用的数学方法为基础的解法,应更受到他们的欢迎。

本书力求弥补上述差距,所采用的简单明了的算符形式,一方面与线性微分方程联系紧密,另一方面又为传递函数的运用提供了可能。本书还十分注意阐明数学结果的具体意义。此外,这些数学结果对于过程控制的工程技术人员也有用处。书中还列举了许多实例,并详细地介绍了它们的求解过程。

第一、二章可以当作绪论。第三至八章介绍建立过程模型的方法。第九至十三章与分布参数系统有关。第十四、十五章介绍求解偏微分方程的近似方法。第十六章研究调节品质,第十七、十八章则研究调节系统的设计。最后,第十九章是过程保护入门。作为过程动态学导论性质的课程可选用第一至八章;作为过程控制和保护的导论时,可选用第十六至十九章;作为过程动态学的高级课程时应包括第九至十五章。

B. 罗菲尔 J. E. 里金斯多普

目 录

译序

前言

第一章 绪论	1
1.1 动态运行	1
1.2 内部变化	2
1.3 外部变化	2
1.4 信息流图	3
1.5 数学模型	4
1.6 稳定性分析	5
1.7 对扰动的响应	7
1.8 自动调节回路	8
1.9 调节品质	9
1.10 调节方案的选择	10
1.11 保护	11
第二章 液位过程的动态特性与控制	12
2.1 工艺过程描述	12
2.2 初始假定与建模方法	13
2.3 自衡	15
2.4 液位测量的动态特性	18
2.5 被调过程的分析	18
2.6 稳定的一般条件	22
2.7 液位调节的应用	24
2.8 例子	24
2.8.1 液位调节	24
2.8.2 压力与液位的调节	28

第三章 阀门特性与校正作用的滞后	35
3.1 阀门特性	35
3.2 阀门增益	38
3.3 实际需要的阀门特性	41
3.4 阀门迟滞与阀门定位器	43
3.5 校正作用的滞后	44
3.6 例子: 流量调节	50
3.6.1 工艺过程	50
3.6.2 调节	51
3.6.3 模型推导	51
3.6.4 模型的近似	56
第四章 长管线动态特性与流量控制	58
4.1 管道物流的动态特性	58
4.2 线性化	60
4.3 特殊情况	63
4.4 完整的流路	65
4.5 压缩机	66
4.6 泵的调节	69
4.7 例子: 压力调节	70
4.7.1 静态分析	71
4.7.2 动态分析	72
第五章 传热过程的动态特性与控制	76
5.1 蒸气加热蒸发器	76
5.1.1 动态特性	76
5.1.2 供气调节阀	79
5.1.3 冷凝液的调节阀	84
5.1.4 蒸发器的壳体	85
5.2 水冷式冷凝器	86
5.3 液-液相换热器	90
5.4 燃烧炉的动态特性	90
5.5 温度检测的动态特性	93

5.6 换热器调节举例.....	96
5.6.1 静态分析.....	97
5.6.2 模型与实际的差异.....	98
5.6.3 动态分析.....	99
第六章 连续流通型反应器的动态特性与控制.....	108
6.1 混合理想的釜式反应器.....	108
6.1.1 一级反应.....	109
6.1.2 平衡反应.....	111
6.2 混合理想的级联反应器系列.....	112
6.3 容量可变、混合理想的等温釜式反应器的动态特性 ...	114
6.4 容量可变、混合理想的等温釜式反应器的调节	117
6.5 处于绝热状态下的固定床催化反应器.....	120
6.5.1 模型方程.....	121
6.5.2 静态特性.....	122
6.5.3 动态特性.....	124
6.5.4 信息流图.....	125
6.5.5 稳定条件.....	127
6.6 有冷却的混合理想反应器.....	129
6.7 通过调整冷却水流量控制反应器.....	131
6.8 例子：反应器的温度调节.....	133
6.8.1 工艺过程概述.....	133
6.8.2 调节.....	134
6.8.3 静态特性的计算.....	134
6.8.4 动态分析.....	136
第七章 生物反应器的动态特性与控制.....	141
7.1 工艺过程简介	141
7.2 生物氧化净化	142
7.3 生物反应动力学	143
7.4 数学模型	145
7.5 数学模型的线性化	148
7.6 活性污泥过程的控制	151

第八章	精馏塔的动态特性	154
8.1	模型方程	156
8.2	液相流量的响应	159
8.3	气相流量的响应	161
8.4	浓度的响应	164
第九章	分布参数系统的数学模型	167
9.1	几何变量(自变量)的选择	167
9.2	分布变量(因变量)的选择	168
9.3	连续方程	168
9.3.1	质量衡算	169
9.3.2	部分质量衡算	170
9.3.3	能量衡算	172
9.3.4	动量衡算	173
9.4	附加方程	175
9.5	初始条件与边界条件	175
9.6	在偏微分方程中代入代数方程	176
9.7	静态解	177
9.8	线性化	177
9.9	算符	178
9.10	因变量的求解	178
9.11	例子	179
第十章	换热器的分布参数模型	182
10.1	初始假定	182
10.2	模型方程	183
10.3	静态模型	185
10.4	线性化	187
10.5	算符	190
10.6	静态方程的代换	192
10.7	说明	193
10.8	管壁热容的影响	195

第十一章 河流污染	198
11.1 初始假定	198
11.2 模型说明	199
11.3 通解	200
11.4 边界条件	201
11.5 最终解	204
11.6 以矩确定分散作用	205
11.7 应用	211
第十二章 管式反应器的动态特性	213
12.1 等温管式反应器	213
12.2 通解和边界条件的代入	215
12.3 静态分析	217
12.4 特殊情况	218
12.5 分散现象可以忽略的动态特性	220
12.6 绝热管式反应器的动态特性	221
第十三章 催化剂的失活过程	227
13.1 初始假定	227
13.2 模型方程	227
13.3 准静态分析	230
13.4 解法	231
13.5 指数型活性函数	233
13.6 双曲线型活性函数	234
13.7 双曲线型失活过程的实例	235
13.8 结论	239
第十四章 离散化与连续化	240
14.1 例子	240
14.2 差分	242
14.3 线性差分方程	244
14.4 例子	245
14.5 离散误差和稳定性	247

14.6	差分微分方程	252
14.7	河流污染	255
14.7.1	离散方程的求解	257
14.7.2	通解	258
14.7.3	边界条件	258
14.7.4	边界条件的代入	259
14.8	连续化	260
14.8.1	模型	260
14.8.2	边界条件	261
14.8.3	方程组	264
14.8.4	说明	265
第十五章	偏微分方程的数值解	267
15.1	差分微分方程	267
15.2	偏微分方程	272
15.3	离散化	273
15.4	Crank-Nicholson 方法	276
第十六章	调节品质	279
16.1	简易动态模型	279
16.2	减小扰动的影响	281
16.3	比例调节作用	282
16.4	积分调节作用	285
16.5	微分调节作用	288
16.6	PID 调节	289
16.7	调节作用的整定	291
16.8	扰动的阶跃响应	292
第十七章	调节方案的选择	294
17.1	目标的确定	295
17.1.1	优先权	295
17.1.2	物料的质量	296
17.1.3	工艺过程操作的约束条件	297
17.1.4	工艺设备的约束条件	297

17.1.5	操作费用	298
17.2	校正变量的选择	299
17.2.1	不可压缩的介质	300
17.2.2	可压缩的介质	302
17.2.3	自由液位	302
17.2.4	两种液相	304
17.2.5	气(汽)-液相	305
17.2.6	气-固相	306
17.2.7	蒸发和冷凝	308
17.2.8	显热	309
17.3	被调变量的选择	310
17.3.1	含料量的调节	310
17.3.2	接近约束条件的被调变量	310
17.3.3	流量调节	311
17.3.4	环境调节	312
17.4	基本调节方案的选择	312
17.5	扩充调节方案	313
17.5.1	串级调节	314
17.5.2	串级调节、比值调节和选择器	315
17.5.3	分程调节	319
17.6	氨生产的调节方案	320
17.6.1	工艺过程简介	320
17.6.2	控制与保护设备	321
17.6.3	一段裂解装置	321
17.6.4	二段裂解装置	325
17.6.5	废热锅炉	325
17.6.6	吸收、解吸塔和甲烷化装置	326
17.6.7	合成反应器和分离器	326
17.7	例子	326
17.7.1	工艺过程简介	326
17.7.2	调节方案	328
第十八章 精馏塔的控制		331

18.1	过程操作的目标	332
18.2	校正作用的选择	335
18.3	被调变量的选择	336
18.4	控制能力和调节速度	337
18.4.1	压力调节	337
18.4.2	顶部液位的调节	339
18.4.3	底部液位的调节	339
18.4.4	质量的调节	340
18.5	基本调节方案的选择	341
18.5.1	选择用表	341
18.5.2	相互作用	342
18.5.3	选择基本调节方案的其它论据	343
18.6	调节方案的扩展	344
18.6.1	比值调节	344
18.6.2	塔板负荷的调节	346
18.6.3	内回流的调节	346
18.6.4	前馈最优控制	347
18.7	结语	348
18.8	塔器水力学动态特性与控制的详细分析	348
18.8.1	气相流量变化对液相流量变化的影响	348
18.8.2	塔中液相和气相流量的比值调节	350
第十九章	保护	352
19.1	一个可靠的保护系统的必要条件	353
19.2	关于单式保护系统的分析	354
19.3	重合概率	359
19.4	复式保护(二中取一系统)	361
19.5	工作失灵	361
19.6	三中取二保护装置	362
19.7	关于冗余保护系统的介绍	364
19.8	三种保护系统的比较	366
19.9	保护装置的选择	367

19.10 冗余	368
附录 拉普拉斯变换	370
参考文献	373
符号表	377

第一章 绪 论

因果关系对于了解工艺过程的特性具有重要的作用。在过程工艺学中，一般是用物料与能量流或相变化来表达其相互关系的。这点在工艺流程图中可以明显地看出，流程图的箭头表示物流的方向。而过程的动态特性涉及过程的操作，更准确地说，与操作条件的变化有关。它主要研究“如果如何，则将如何”的问题。因此，研究相互关系就是研究因果关系，特别是与时间有关的特性，尤为人们所关注。在间歇过程中，这种特性十分明显；但过程的动态学在连续过程中，也有可以应用的领域。连续过程的运行变化一般可分为以下几类：

1. 动态运行。
2. 内部变化。
3. 外部变化。

1.1 动态运行

当工艺过程在非恒值条件下操作时，就进入了动态运行。例如开、停车或其它操作条件(产品规范)变换等。这类运行通常伴有一定的生产损失。可以利用现有的(动态规划^[1]，最大值原理^[2])数学方法求得某种操作模式，以便使生产损失为最小。然而，现代化的化工厂大都十分复杂，除非先作大量的简化，否则很难采用这些方法。

有时，也有这种情况：工艺过程的某个局部是动态运行

的,例如触媒床的再生或燃烧室的清理。显然,这会对工艺过程其它部分的运行产生扰动。

最后,还有一类动态运行,即在正常操作期间,人们有意对连续过程作某种(往往是周期性的)改变。萃取塔的脉动就是一例:塔内有规律的重复脉动可以促进两种液相的混合^[3]。将这一方法用于其它工艺过程,如精馏和化学反应器^[4,5]的研究业已完成。本章假定所有工艺过程均在恒值条件下运行。内部与外部的变化可以干扰这一预定的状态。

1.2 内部变化

过程设备与控制仪表的故障会引起激烈的内部变化。令人费解的是,有时工艺过程并无异常,但却偏离了预定的恒值状态。以发生放热反应的化学反应器为例,反应温度稍有增加,就会导致放出更多的热量,而这一热量并不一定能与增加的排热量相符合。另一种工艺过程不稳定的情形是自发的周期性起伏现象。在上述两种情况下,工艺过程都是不稳定的。介于两者之间的情况是由于积垢、催化剂中毒以及炉管结焦等所引起的连续工况的缓慢变化。

1.3 外部变化

这类变化指连续运行受到外部作用干扰的情况。在很多情况下,这是一个沿进料、加热与触媒物流等而进入过程的扰动问题。这里所谓的扰动,具有专门的意义,即在过程设备和控制仪表并无故障的条件下,过程工况的较小变化。过程变量对某些简单扰动的响应,后面将作更为详细的讨论。对恒值操作而言,无论是由于内部还是外部的原因,一切变化都是