



苏 И.В.阿尼西莫夫 В.И.鲍特罗夫 В.Б.波克罗夫斯基 著

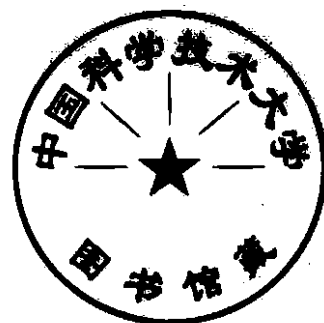
精馏设备的 数学模拟及最优化

化学工业出版社

精馏设备数学模拟及最优化

И. В. 阿尼西莫夫
〔苏〕 В. И. 鲍特罗夫 著
В. Б. 波克罗夫斯基

孙义鹄 译



化学工业出版社

内 容 提 要

本书叙述分离二元和多组分混合物的精馏设备的数学模拟、最优化和控制问题。书中特别重视构成工艺过程自动控制系统问题，尤其是选取经济上有充分理论依据的控制水平问题。大部分算法用算法语言«ALGOL»编制成了计算机程序。

本书供化工、炼油和其它工业部门的工程技术人员作参考。此外，本书对专门从事和学习化工自动化和化工控制论的教师、研究生和大学生也有一定的参考价值。

И.В. АНИСИМОВ В.И. БОДРОВ В.Б. ПОКРОВСКИЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
РЕКТИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ» (МОСКВА • 1975)

精馏设备的数学模拟及最优化

孙义鹗 译

化学工业出版社 出版

(北京和平里七区十六号楼)

北京通县曙光印厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $7 \frac{1}{8}$ 字数 189 千字 印数 1—2,900

1982年9月北京第1版 1982年9月北京第1次印刷

统一书号 15063·3315 定价 0.90 元

译 者 序

苏联И·В·阿尼西莫夫等所著“精馏设备数学模拟及最优化”一书，对二元和多元混合物精馏过程的静态和动态数学模型、最优化问题以及精馏装置最优自动控制系统的建立等作了系统的叙述。该书是迄今在这方面内容最为完整的专著，书中附有详细的算法框图以及用 ALGOL 语言编写的源程序。虽然作者在建立精馏设备的数学模型时所采用的某些简化假定（例如，将相平衡常数 K_i 视为仅是温度 T 的函数）将使其工程实用范围受到限制，但该书对我国化工、石油工艺工作者以及从事化工自动控制的工程技术人员仍不失为一本颇有参考价值的读物。因此，将此书翻译出来。

在翻译过程中，译者得到党组织和同志们热情关怀和鼓励，全部译稿承华东石油学院郭天民教授和上海化工学院蒋慰孙教授审阅，借此机会译者谨向他们致以衷心的感谢。

孙义鹤 于上海化工研究院

一九八〇年八月

序

从工艺过程的局部自动化过渡到建立工艺过程自动控制系统，是近十年来才开始的。由于单机生产能力的显著增长，所以在对象的设计阶段就出现建立控制系统问题。产生了不仅是使各别的机组，而且要使整个工艺装置维持最优工况的问题。从统一的最优化准则观点看来，选取机组的结构参数以及综合自动控制系统的结构，同样也是一个重要的问题。

由于化学工艺学理论基础领域里取得的巨大成就和电子计算机的迅速发展，使得有可能实际利用数学模拟的方法解决上面提出的问题。

对某些类型精馏设备的数学模拟方法进行有系统的研究，是本书作者之一领导下的莫斯科化工机械学院《化工生产自动化》教研组于1960年开始的。关于构成最优控制系统的部分研究结果叙述在本书中。

本书在叙述时贯穿着这样一条线索：

循序地叙述精馏过程的数学模拟方法；

研究那些考虑到传质动力学的二元和多组分混合物精馏的非线性模型。这种非线性模型不但在对象的最优化设计阶段是有用的，而且在研究最佳控制系统时也是有用的；

将实现数学模型的算法引入用算法语言《ALGOL》编制的计算程序

根据工业设备的工作数据检验所提出的数学模型；

系统地叙述新颖的最优化算法，并对所有类型的精馏设备固有的共性予以特别的注意；

作出简化的最优化算法，把这种简化的最优化算法引用算法语言《ALGOL》编制的计算程序；

以经济上的合理性的评价为出发点，叙述控制系统的综合方

36856

法，为此，对数学模型的准确性、测量精度等方面提出了要求。

从1965年开始，本书的大部分章节由作者分别于以C.M.基洛夫名字命名的喀山化工工艺学院在《化工过程的数学模拟》课程中对工艺专业的大学生进行讲授，在《化工过程的数学模拟和最优化》课程中对专门学习化工控制论的大学生进行讲授，于莫斯科化工机械学院和唐波夫化工机械学院在《化工生产自动化》课程中对专门学习化工生产自动化的大学生进行讲授。考虑到本书的篇幅有限，作者有意不对已获得的所有结果进行详细的叙述。例如，数学模型的证明问题^[60,72]，整理工业试验结果的算法^[53,72]，最优化设计（考虑到对象的动态特性）与控制问题的关系^[73]，动态最优化问题^[68]都不在本书中加以讨论。

在叙述时，我们认为读者对精馏过程及数学模拟原理已经有所了解，同样也认为读者已经熟知矩阵理论的重要概念。

本书是最先有系统地叙述精馏设备数学模拟和最优化问题的书籍之一，因此，不可避免地存在一定的缺点。对本书的所有建议和意见作者将予以采纳并表示感谢。

作者对共同从事科学研究工作的B.H.克里夫苏诺夫，H.H.柯雪也夫，B.Π.克里伏雪也夫表示感谢，对B.C.安德烈夫，C.E.阿罗尼，A.A.勃拉也夫，A.E.符拉索夫，B.Π.柴罗金，K.C.列别捷夫，A.A.马塔魏也夫，Ю.Н.舍费也娃，B.C.福米以及罗马尼亚人民共和国同行И.达罗巴茨和德意志民主共和国同行K.克里姆卡同样表示感谢。作者感谢B.M.帕拉多诺夫教授对本书提出宝贵的意见和建议。

绪 论

数学模拟已成为化学工程中一种工具[1, 8, 17, 18, 44]。然而说到建立化工工艺对象数学模拟的严格的理论, 尚为时过早。此外, 在解释某些定义和概念时的不一致, 在处理数学模拟原则时多多少少有点不相同, 还会引起一定的复杂性。

下面列举以后要经常采用的一系列概念:

模拟对象可以是任何一种自然界(技术界, 化学界, 生物界, 社会界)的现象。

对象是以因果关系来表征的。因的数量上的表达式称为对象的输入, 且以集 $\{x\} = X$ 来表征(图P-1)。果的数量上的表达式称为对象的输出, 且以集 $\{y\} = Y$ 来表征。

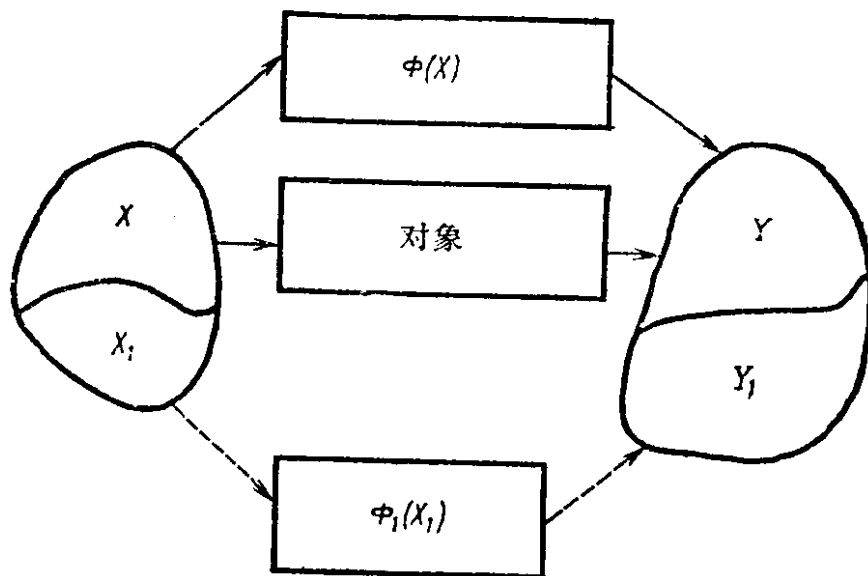


图 P-1 关于数学模型的概念

要考虑对象固有的所有因果关系实际上是不可能的, 因此, 仅在多种多样的因果关系中分出为给定的目的所特有的那一部分因果关系(例如, 只分出对象的机械特性)。

我们将利用函数关系集 $\{f\} = \Phi$ 给出因果关系。我们认为, 集

$\{f\} = \phi$ 定义 $\{x\} = X$ ，并认为数字或函数是集 X 和 Y 的组成部分，而函数或算子相应地是 ϕ 的组成部分。集的总数是有限的，然而，集的组成部分的数目却可以相当大。

集 ϕ 称为数学模型。集的形成没有唯一的规则，这就使反映对象某一特性的模型的集总是可以确定的。实际的目的迫使在模型中分出实质性的关系，就是说，需引用子集 $\phi_1 \subset \phi$ ，其结果是得到模型的完整性的概念（由 ϕ 确定的模型比由 ϕ_1 确定的模型更完整）。这样，数学模型——是以数学形式来表示的我们所关心的对象特性的一种反映。

数学模型具有分级的结构。分层描述是阐明分级结构的有效方法。在化学工艺过程的数学模拟方面采用这种方法是适宜的。

层位——表征对象的一定特性的描述的水平。相互间有联系的层的总和组成数学模型。

层位的选择取决于具体的研究目的，且不是唯一的。在分级结构中层位的位置愈低，对象各方面的描述就愈详细；层位的位置愈高，研究的目的就变得愈明显。显然，每一层位是由更低水平的层位的总和组成的（图P-2）。

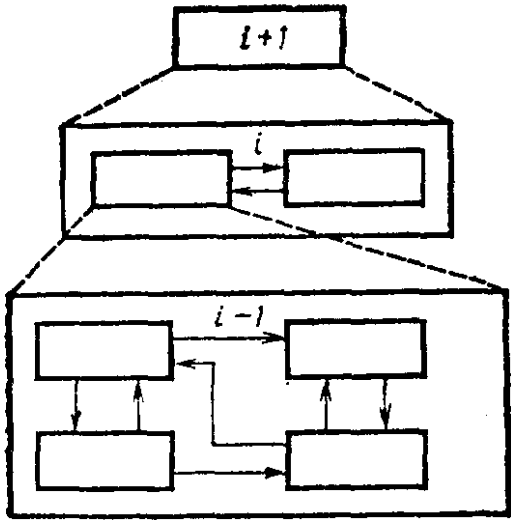


图 P-2 分层模型的结构

数学模型可以由理论方法、形式统计方法和综合方法获得。构成数学模型的理论法是根据研究对象某一特性的各学科所

累积的资料来确定 $\phi(X)$ 的。只对于一些比较简单的假定的对象，才可以通过理论方法获得具体的结果。然而，这种方法在方法学上的意义却是很重要的，它能以描述普遍的物质守恒定律（能量守恒定律，动量守恒定律）的微分方程的结构形式，定性地估计 $\phi_1(X_1)$ 。需要指出的是，从方法学观点看来，理论方法是通用的，它不但可适用于实际的对象，而且也可适用于设计中的对象。

形式统计法归结为在实现 X_1 和 Y_1 的同时，试图以事先给定的、范围比较狭窄的某一类 $\hat{\phi}(X_1)$ 来近似地估计 $\phi(X_1)$ ，而关于 $\hat{\phi}(X_1)$ 本身的结构实际上不能够作出解释。这种方法是与研究“黑匣子”的著名问题相等价的，就是说，问题是在描述对象品质的信息层的水平上建立数学模型。采用这种方法只限于实际对象，它在设计阶段是不能采用的。这种方法的优点是比较成熟且实际实现比较简单。

综合法兼有理论法的通用性和形式统计法的简单性。这时，为了定性估计 $\phi_1(X_1)$ ，利用了描述普遍的守恒定律的微分方程结构，而方程的各系数用形式统计法求得。综合法能实现数学模拟的主要假定之一：有独立地研究对象的不同层位的可能性。

数学模型可分为静态数学模型，准静态数学模型和动态数学模型。

引入过程的静力学数学模型（静态数学模型）的变量值以及方程，与时间无关。在设计装置和工艺过程时，在选择自动控制系统结构时，在实现静态最优化时，一般都要应用静态数学模型。

输入和输出变量的关系，而在一般情况下，方程的系数与时间的关系，可作为过程的动力学模型的特点。动态模型的应用范围——研究控制系统和某些过程（例如，间歇过程），实现动态最优化。

实际上，往往会遇到引入数学模型的方程的系数与时间有关，而输入变量值与时间无关的这样一种情况。在这种情况下应用具有可变系数的静态数学模型——准静态数学模型。

数学模拟和最优化过程是由一系列阶段组成的（图P-3）。显然，每一阶段又包含一系列小阶段。

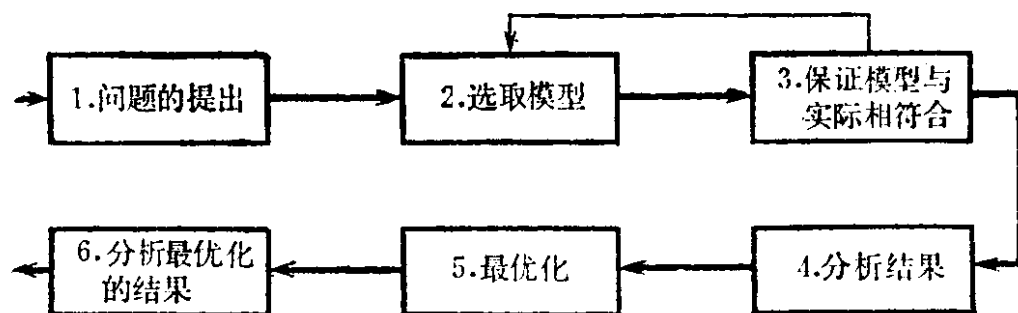


图 P-3 数学模拟过程方块图

第一阶段——模拟问题的提出。这是最重要阶段之一，它包括下列各个小阶段。

研究对象。根据技术文件和参考资料，研究对象中进行的进程的特点和对象的结构外形，查明对象与实际上已经实现的对象之差别。

分析检测和控制问题。在这一小阶段中将类似的对象的控制问题进行分类，选出在给定情况下假设采用的控制问题的类别，并为控制问题作出对象结构的各种不同方案。

建立原始数字资料。在这一小阶段中弄清楚物质的状态参数和物理化学性质，同时弄清楚这些值的可能变化范围。

建立模拟目标。在这一小阶段中选取独立变量，最优化准则和限制条件的各种可能的方案。确定在第四阶段必需得到回答的问题的项目单（图P-3）。

第二阶段——选取数学模型包含下列各小阶段：

在分层描述的水平上选出数学模型的拓扑学结构；

采用一组假定并选出低水平层位的数学模型；

编制实现对象数学模型的算法；

转换成数字计算机上的程序，调整并定性估计检验方案。

第三阶段——保证数学模型与实际相符：

对系统或整个对象的各个层位组织试验研究；
保证模型与实际相符合。

第四阶段——通过数学模拟方法获得结果并对这些结果加以分析——通常包含下列各小阶段：

分析独立变量与输出变量和最优化准则的主要关系；

分析可能的最优化准则的灵敏度并淘汰不重要的影响关系；

分析最优化问题的允许区域；

分析过程的自动最优化的经济合理性。

第五阶段——提出最优化的具体问题。在前几个阶段已经获得了所需的信息，可避免不必要一般地提出最优化问题，因而第五阶段通常包含下列小阶段：

陈述最优化问题，确定最优化问题的类别，并分析用现有的数学保证来实现最优化算法的可能性；

编制最优化算法，转换成程序，定性估计检验方案。

第六阶段——分析最优化结果——包含下列小阶段：

揭示最优状态的性质；
拟定对象的自动最优化

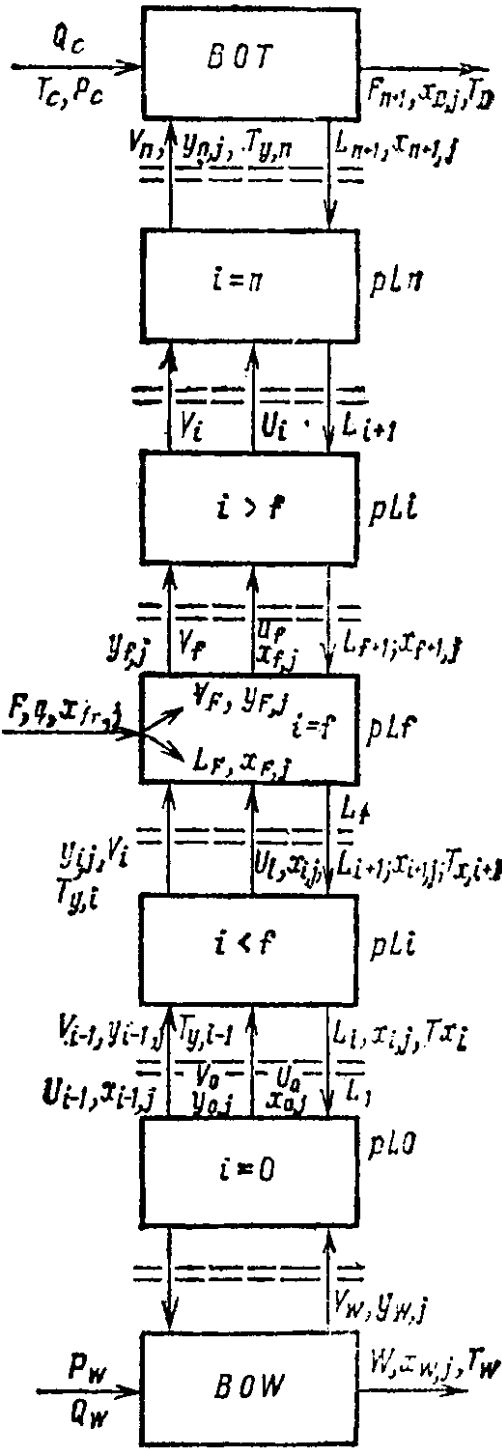


图 P-4 精馏设备结构图

系统的结构；

对利用最优状态性质的最优化算法的建立问题进行研究。

下面讨论分离二元和多组分混合物的精馏设备的数学模拟的各个阶段。

现在，构成精馏设备数学模型的过程，特别是对于接近理想的混合物。在很大程度上已经模式化了。为了过程的模式化，必须有：

系统的较低层的典型数学模型图集；

数字计算机的数学保证，这种数学保证包括一组实现典型数学模型的程序；一组用来计算给定的拓扑学结构的算法；一组成套的程序。

可以把简单的精馏设备的结构表示成具有两个水平的分层结构形式（图P-4）。最高水平——这是一些包括设备各个部分的层位。该水平的各个层位可根据用数字计算机实现数学模型的各工序的标题来命名：再沸器—BOW，分凝器—BOT，冷凝器—BOC，受槽—VEL，最低水平——这是一些确定接触装置数学模型的层位（通常定形成MOD形式）。

符 号

- D_x ——液相中有效扩散系数；
 D_y ——气相中有效扩散系数；
 d_p ——塔板间距离；
 F ——液体流量(第一章至第五章)；回流量(第一章,3)；
 f ——进料塔板号码；
 G ——液体或蒸气量；
 H ——蒸气热焓；
 h ——液体热焓；
 K^* ——对于组成多组分混合物的二元混合物，单位高度的传质系数；
 K ——二元混合物的传质系数；
 $K_j(T)$ ——第 j 组分相平衡常数与温度关系；
 L ——液体流量；
 L_1 ——提馏段中液体流量；
 L_2 ——精馏段中液体流量；
 l ——液流截面的线性尺寸；
 M ——克分子重量；
 m ——栅格模型的栅格数(第一章1,第二章,1)；塔板上区段数(第一章,2)；平衡曲线倾角的斜率(第一章,3)；提馏段区段数(第一章,3；第二章,3)；
 n ——塔板数(第一章,第五章)；待分离混合物的组分数(第一章,3)；
 P ——压力；
 Q ——热量；
 q ——能量状态(第一章至第五章)；精馏塔的划分区段数(第一章,3；第二章,3)；
 r ——汽化热(第一章1,2)；待分离混合物的组分数(第二章1,2)；
 S ——塔板有效面积；
 S^0 ——管子流通截面积；

T ——温度；
 t ——时间；
 U ——带液；
 V ——蒸气流量；
 W ——釜液流量；分凝器中水的流量(第四章，5)；
 X^j ——第 j 组分在液相的单位长度区段内的数量；
 x ——液体中易挥发组分浓度；
 Y^j ——第 j 组分在气相的单位长度区段内的数量；
 y ——气体中易挥发组分浓度；
 $y^*(x)$ ——在与成分为 x 的液体相平衡的气体中易挥发组分的浓度；
 y_{ijf}^s, x_{ijf}^s ——分别为气体和液体中在相分界面上第 j 组分在第 i 块塔板的第 s 区段中浓度；
 z ——区段的无因次高度(第一章，3；第二章，3)；
 Z ——液层高度(第一章，2)；
 Z^o ——溢流区段的边沿高度；
 α ——待分离组分在分离条件下相对挥发系数；
 β_x ——液相的部分传质分系数；
 β_y ——气相的部分传质分系数；
 γ ——比重；
 δ ——可变的高度；
 η ——接触装置效率；
 η^o ——局部效率；
 ρ ——克分子密度；
 τ_l ——由冷凝器引起的滞后；
 ω ——液流的线性速度。

下 标

c, con ——冷凝器参数；
 reb ——塔釜参数；
 mv ——易挥发组分参数；
 mix ——混合物参数；

$B; D; n+1$ ——馏出物参数;
 D_j ——馏出物中第 j 组分参数;
 F ——进料的液体和气体部分流量参数;
 f ——进料板参数;
 i ——塔板号码, 第 i 块塔板参数(第一章至第五章), 区段号码, 划分的区段的参数(第一章, 3);
 i_L ——第 i 区段下截面参数;
 i_u ——第 i 区段上截面参数;
 i, j ——第 i 块塔板和第 j 组分参数;
 $m; x; L$ ——液相参数;
 $n; y; v$ ——气相参数;
 f_r ——进料流量参数;
 lv ——难挥发组分浓度;
 st ——提馏段参数;
 $V; O; H$ ——塔釜产品参数;
 $O; j$ ——塔釜中第 j 组分参数。

上 标

c ——冷凝器参数;
 reb ——塔釜产品组分;
 k, j ——组成二元蒸气的组分的号码;
 f_s ——进料截面参数;
 d ——分凝器参数;
 i ——精馏塔的划分区段号码(第一章, 3; 第二章, 3; 第三章);
 j ——塔板的段号(第一章, 2), 混合物的组分号码(第二章, 3);
 s ——塔板的段号(第二章, 1);
 O ——溢流管参数(第一章, 2); 静态参数(第一章, 3)。

目 录

第一章	分离二元混合物的板式精馏设备的数学描述	(1)
1.	静态数学描述	(1)
2.	动态数学描述	(14)
3.	具有大量塔板的精馏设备的动态数学描述	(18)
第二章	分离多组分混合物的板式精馏设备的数学描述	(29)
1.	静态数学描述	(29)
2.	不考虑传质动力学的动态数学描述	(33)
3.	具有大量塔板的板式精馏设备的 线性化的动态数学描述	(36)
第三章	应用数学计算机模拟精馏设备的工况	(52)
1.	二元混合物精馏设备的静态数学模拟	(52)
2.	多组分精馏设备的静态数学模拟	(89)
3.	动态数学模拟	(106)
第四章	精馏设备的静态最优化	(121)
1.	静态最优化问题的提出	(121)
2.	单位目标产品动力消耗的最小化 (问题 I)	(125)
3.	生产率的最大化 (问题 II)	(129)
4.	精馏设备分离能力的最大化 (问题 III)	(136)
5.	收入的最大化 (问题 IV)	(136)
6.	求解最优化问题的某些算法	(137)
7.	分离多组分混合物的精馏设备工况的最优化	(143)
8.	最优状态的性质	(155)
第五章	精馏设备自动控制系统的综合	(157)
1.	综合问题的提出	(157)
2.	调节系统最优结构的选取	(158)
3.	确定自动静态最优化的合理性的方法	(180)
4.	采用动态最优化系统的合理性的问题	(188)
附录	利用控制计算机确定自动静态最优化合理性的 方法的应用示例	(199)
	参考文献	(210)

第一章 分离二元混合物的板式精馏 设备的数学描述

1. 静态数学描述

塔板的数学模型

根据所采用的假定可对一系列塔板的模型作出数学描述。对于下面列举的所有模型，采用下列假定：

- 1) 在给定塔板上的压力是恒定的；
- 2) 液体处在沸点下，蒸气处在露点下；
- 3) 待分离混合物接近于理想混合物；
- 4) 组分的物理化学性质在给定的塔板上是常数，并在可能的浓度变化范围内取平均值。

除了一般性的假定之外，还可作出特殊的假定。

对于给定的塔板，在下列特殊假定下，可采用模型 1：

- 1) 液流和气流是常数；
- 2) 液相是理想地混合的；
- 3) 气相是理想地混合的；
- 4) 带液是常数。

描述模型 1 的方程具有下列形式：

$$V_i = V_{i-1}, i = 1, 2, \dots, n; i \neq f \quad (1.1)$$

$$L_i = \begin{cases} V_{i-1} + U + W, & i < f \\ V_{i-1} + U - F_{n+1}, & i > f \end{cases} \quad (1.2)$$

$$x_i = \begin{cases} \frac{1}{V_{i-1} + U + W} (V_{i-1} y_{i-1} + U x_{i-1} + W x_0), & i < f \\ \frac{1}{V_{i-1} + U - F_{n+1}} (V_{i-1} y_{i-1} + U x_{i-1} - F_{n+1} x_{n+1}), & i > f \end{cases}$$