

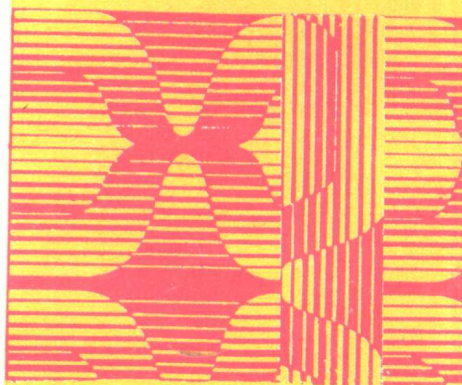


中央广播电视大学教材

化工工艺过程计算 学习指导

HUA GONG GONG
YI GUO CHENG JI
SUAN

王双成 编

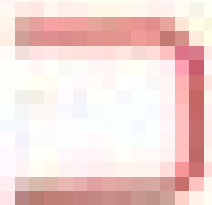


中央广播电视大学出版社

Q015
9



化工工艺过程计算 学习指导



化工工艺过程计算学习指导

王双成 编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字 163 号

图书在版编目(CIP)数据

化工工艺过程计算学习指导/王双成编. -北京: 中央广播电视大学出版社, 1995. 5

ISBN 7-304-00989-6

I. 化… I. 王… III. 化工过程: 生产工艺-化工计算-电视大学-教材 IV. TQ015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 08485 号

化工工艺过程计算学习指导

王双成 编

中央广播电视大学出版社出版

社址: 北京复兴门内大街 160 号 邮编: 100031

北京印刷三厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本 787×1092 1/16 印张 5.75 千字 144

1995 年 2 月第 1 版 1998 年 2 月第 2 次印刷

印数 5001—7000

定价 7.60 元

ISBN 7-304-00989-6/TQ·13

前 言

这本学习指导是为学习电视大学化工工艺过程计算课程的学生编写的,与1994年中央广播电视大学出版社出版的,由朱士亮主编的《化工工艺过程计算》教材(称为本课程的主教材)配套使用。

根据“中央广播电视大学化工工艺过程计算课程教学大纲”的要求和该课程的特点,本书每章包括四个部分。第一部分为学习要求,按教学大纲的教学基本要求提出每章的具体学习要求;第二部分为教学方式安排,提出每章电视教学、面授教学和自学部分的内容和学时分配,其中的面授教学学时数不包括电视课辅导学时,电视课辅导学时数按有关规定执行;第三部分为学习提要,阐述每章的基本学习内容,并编写了部分例题;第四部分为主教材部分思考题解答,以帮助学生理解主教材的概念和内容。为了帮助学生演算习题,书末编入了主教材各章习题的参考答案。

《化工工艺过程计算》教材主编朱士亮教授、中央广播电视大学陈灏副教授曾对本书稿进行了审阅,并提出了宝贵的意见,在此谨致谢意。

由于编者水平有限,编写时间仓促,错误与欠妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1994年9月

目 录

第一章	绪论	(1)
第二章	物料衡算	(5)
第三章	化学反应过程的物料衡算	(17)
第四章	能量衡算	(32)
第五章	化学反应过程的能量衡算	(43)
第六章	物料与能量的联合衡算	(53)
第七章	不定常过程的物料衡算与能量衡算	(61)
第八章	化工过程的焓分析	(64)
第九章	化工过程开发与设计	(71)
第十章	化工工艺设计	(79)
主教材习题参考答案		(84)

第一章 绪 论

学 习 要 求

1. 熟练掌握物流变量温度、压力、组成、流量的表示方法。熟练掌握以下概念：连续过程与间歇过程，定常过程与不定常过程，化工过程与单元，系统与外界，敞开系统与封闭系统，物流与能流，组分与组成，干基组成与湿基组成，状态与状态函数，强度性质与广度性质，物流变量与独立物流变量，量纲与量纲的一致性，计算基准，组成归一性方程，工程观点，过程的回收率与净化率，转化率、收率与选择性。

2. 掌握各类化工过程工艺评价指标的表示方法。

3. 了解化工工艺过程的特征、构成与分类，化工工艺过程计算的内容和作用，以及化工企业能平衡的作用。了解以下概念：能平衡，能源与能耗，一次能源与二次能源，设备能量利用率，余热与余热利用率，产品单耗与产品理论单耗，产品可比能耗，设计型计算与操作型计算。

教学方式安排

电视教学：1学时。内容（第1讲）如下：

本课程的主要学习内容和学习要求，化工工艺过程的构成与分类（1·1），化工计算中的一些常用名词和术语（1·4·1）。

面授教学：1学时。内容为：化工工艺过程计算的内容和作用（1·3·1，1·3·2），化工过程中的物流变量（1·4·2），化工过程的工艺指标（1·4·3）。

自学内容：化工工艺技术人员任务（1·2），化工企业中的能平衡（1·3·3）。

本章作业：习题1，3，4。

学 习 提 要

一、化工工艺过程的构成与分类

化工工艺过程是使原料发生各种物理与化学变化以加工成为化工产品的过程。化工工艺过程通常由原料预处理过程、化学反应过程和产物后处理过程三个部分构成。复杂化工工艺过程中的某些子过程也常常是由这三个基本部分构成的。化工工艺过程又可以看成由反应器、若干单元操作和贮料器构成。存在化学反应是化工工艺过程的基本特征，反应器是化工工艺过程的中心环节。

化工工艺过程可按原料或产品的属性分类，也可按照过程的操作方式或时间特征分类。按过程的操作方式可分为连续过程、间歇过程和半连续过程三类。原料连续输入设备而产品连

续输出设备的过程称为连续过程，其特点是过程的连续性；原料一次加入设备，操作完成后产物一次卸出的过程称为间歇过程，其特点是操作的周期性；某些阶段是连续操作而另一些阶段是间歇操作的过程称为半连续过程。按照过程的时间特征，化工工艺过程可分为定常过程和不定常过程，各个部位的操作变量不随时间而变的过程称为定常过程，操作变量随时间不断变化的过程称为不定常过程。

二、化工工艺过程计算的内容和作用

化工工艺过程计算的内容包括：过程与设备的物料衡算、能量衡算和焓衡算；各个设备的工艺条件和工艺尺寸的计算；管路计算；各种输送设备和转能设备的选型和操作评价计算；以及过程和设备的优化计算；设备内部参数分布特性和动态特性的计算等。其中物料衡算和能量衡算（简称化工计算）是其它计算的基础。

化工工艺过程计算可大体分为设计型计算和操作型计算两种。设计型计算是根据既定的设计要求进行的，其作用是确定各设备进出口物料的流量和组成、物料的状态、设备的热负荷和动力消耗，以及设备的工艺尺寸。操作型计算是根据一定的流程和设备条件进行的，其作用为：分析操作条件改变对操作结果的影响，以保证在优化的条件下操作和进行生产调整以适应操作条件的变化；分析实际生产过程，找出生产中的薄弱环节；通过对操作设备的物料和能量衡算，了解设备的操作特性，作为评价设备的操作性能和改进设备、强化过程的依据。

三、化工计算中的若干基本概念

1. 化工计算的一些常用术语

(1) 化工过程与单元 完成某种特定任务的工艺设备或其组合称为单元，如换热器、反应器、精馏塔系统。若干单元的组合就构成化工过程。二者的关系是整体与局部的关系。

(2) 系统与外界 研究的对象称为系统，系统以外与其有紧密联系的部分称为外界或环境。根据研究的需要，系统可以选一个完整的化工过程或过程的一部分或一个单元，也可选设备的某一部分或某一物流。与环境间只有能量交换而无物质交换的系统称为封闭系统，与环境间既有能量交换又有物质交换的系统称为敞开系统或流动系统。

(3) 物流与能流 以相同的方式和状态进入或离开系统的物料和能量分别称为物流和能流。

(4) 组分与组成 组分是构成物料的各个成分，组成是物料各组分的相对数量关系。

(5) 状态和状态函数 如系统的各种热力学性质都有一个确定的值，这个系统就处于一定的状态，系统的热力学性质就是其状态函数。状态函数分为强度性质和广度性质，其值与系统物料总量有关的热力学性质称为系统的广度性质，否则为系统的强度性质。由相律知，系统的自由度 f 与其组分数 k 和相数 φ 的关系是

$$f = k - \varphi + 2$$

这里应注意：(1) f 为确定系统全部强度性质所必须赋值的独立强度性质数目；但即使给定子 f 个独立的强度性质的值，该系统广度性质的值仍不能确定。(2) 要确定系统的全部强度性质和广度性质，则要规定 $f+1$ 个独立的状态函数数值，而且这些要规定数值的状态函数中至少要有有一个广度性质。

关于系统自由度的计算见主教材例 1-1。

(6) 物流变量与独立物流变量 物流的各个状态函数都是物流变量。对于含有 k 个组分的

一定状态下不发生化学反应的单相物流，要完全确定这一股股的状态，其独立物流变量数为 $f+1$ 即 $k+2$ 个，并且其中至少要有有一个广度性质；要确定该流股的全部强度性质，则需要规定 $k+1$ 个独立的强度性质。关于物流独立变量数的确定见主教材例 1-2、例 1-3、例 1-7。

(7) 计算基准 物料衡算和能量衡算都要选择基准，基准是计算的出发点和参照系。选定基准的目的是为了保证计算的一致性。基准的选择有一定任意性，选择的原则是使计算简便。可选择一定操作时间内的物料处理量或某一股物流的流量作为物料衡算的计算基准。

(8) 量纲、单位的一致性 某种物理量通过几个基本物理量来表达的关系称为该物理量的量纲。正确的物理量方程中各项的量纲必须相同，各项的单位必须一致，这称为量纲的一致性和单位的一致性。量纲一致性的检验见主教材例 1-4。

2. 化工过程中的物流变量

化工过程中经常涉及的物流变量有温度、压力、流量、组成等，有时还包括相状态。

(1) 温度 我国法定的温度为热力学温度（单位为 K）和摄氏温度（单位为 $^{\circ}\text{C}$ ）。二者的关系是： $t = T - 273.15$ 。用热力学温度和摄氏温度表示的温差相等： $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ 。

(2) 压强（习惯称压力） 压力的表示方式有绝对压力、表压和真空度，其法定计量单位为 Pa。

(3) 流量 流量的表示方式有体积流量 V 、质量流量 G 和摩尔流量 n ，其关系为

$$G = nM_r = V\rho$$

(4) 组成 常用的各种组成表示的定义式如下：

$$\text{组分 } j \text{ 的质量分数 } w_j = \frac{G_j}{\sum_j G_j} \quad \text{组分 } j \text{ 的摩尔分数 } x_j \text{ (} y_j \text{)} = \frac{n_j}{\sum_j n_j}$$

$$\text{组分 } j \text{ 的质量浓度 } \rho_j = \frac{G_j}{V} \quad \text{物料的密度 } \rho = \frac{\sum_j G_j}{V}$$

$$\text{组分 } j \text{ 的摩尔浓度 } c_j = \frac{n_j}{V} \quad \text{物料的总摩尔浓度 } c = \frac{\sum_j n_j}{V}$$

$$\text{组分 } j \text{ 的体积分数 } \varphi_j = \frac{V_j}{\sum_j V_j}$$

$$\text{组分 } j \text{ 的摩尔比 } X_j = \frac{n_j}{n_b} \quad \text{组分 } j \text{ 的质量比 } W_j = \frac{G_j}{G_b}$$

系统内各组分物料量占总物量的分率之和等于 1，称为组成归一性方程，即有下列式子成立：

$$\sum_j w_j = 1$$

$$\sum_j x_j \text{ (或 } y_j \text{)} = 1$$

$$\sum_j \varphi_j = 1$$

$$\sum_j (c_j / \sum_j c_j) = 1$$

$$\sum_j (\rho_j / \sum_j \rho_j) = 1$$

含水物料的组成可用干基组成和湿基组成表示。湿基组成是将水分考虑在内的物料组成，干基组成是不包括水分在内的物料组成。干基组成和湿基组成均可用质量分数、摩尔分数或体积分数来表示。

有关物流变量的计算，参看主教材例 1-5、例 1-6、例 1-8、例 1-9。

3. 化工过程的工艺指标

化工过程的工艺指标按性质和作用可大体分为物料规格（质量）指标，操作控制指标和工艺评价指标三类。物料规格（质量）指标包括原料和产品及单元进出物料的规格。操作控制指标是各工序必须控制的操作条件指标。过程工艺评价指标是从工艺角度评价过程或单元进行好坏的指标。常见的工艺评价指标有过程回收率、转化率、收率、选择性、设备能量利用率、余热利用率、产品单耗等。

主教材部分思考题解答

p. 4 [2] 定常过程的基本特征是什么？既然实际生产操作条件总是随时间发生波动，为什么又可作为定常过程来处理？

答 定常过程的基本特征是系统内部各部分不发生物料和能量的积累，这是因为该过程各部分的操作变量不随时间而变。但这里的不随时间而变是个宏观的、平均的概念，虽然实际生产操作条件总是随时间发生波动，但若在一定时间间隔内各参数的平均值基本不变，即在这段时间内物料和能量的积累量为零，则该过程就可作定常过程处理。

p. 14 [2] 有量纲就有相应的单位，因此量纲一致性和单位一致性的作用是一样的，对不对？

答 不对。量纲一致性的作用是检验物理方程是否错误，不满足量纲一致性的物理方程一定是错误的。单位一致性可用来检验某个正确的物理方程计算是否错误，不满足单位一致性时，该方程的计算结果一定是错误的。

p. 21 若反应器中只发生一个反应，但产物有好几个，其中只有一个是目的产物，为了评价反应器的运行情况和原料的利用情况，可选用哪些指标？

答 可选用转化率评价过程。对于只发生一个反应的过程，转化率与收率相等，而选择性等于 1。因此收率和选择性对于复杂反应过程才有意义。

p. 22 [2] 如果有两个同类过程的设计方案供选择，其中一个产品原料单耗较高而可比能耗较低，而另一个刚好相反，你将如何抉择？

答 一般应比较两方案的操作成本或利润。因成本或利润是评价过程经济性的综合指标，它反映了过程原料消耗和能耗的综合影响。在必要时，也要考虑当时当地原料和能源的实际供应情况。

第二章 物料衡算

学习要求

1. 熟练掌握物料与能量守恒定律的一般表达式，总物料衡算、组分衡算和元素衡算的通用关系式（包括质量衡算和摩尔衡算），物料衡算的步骤，各种物流组成间的换算；熟练掌握简单物理过程（含相平衡约束和不含相平衡约束）的物料衡算方法和解题技巧及多单元物理过程的物料衡算方法和解题技巧。
2. 掌握简单物理过程和多单元物理过程物料衡算的自由度分析方法。
3. 了解间歇过程的物料衡算方法，判断物流相状态的方法和方程变量矩阵的应用。
4. 熟练掌握以下概念：总衡算、组分衡算和元素衡算，质量衡算与摩尔衡算，物料衡算式的齐次性，通过单元、混合单元、分离单元和分割单元，泡点与露点，相平衡常数，拉乌尔定律，亨利定律，循环、排放和旁路。掌握以下概念：自由度与设计变量，系统独立变量与独立约束，物料衡算约束、相平衡约束和约定约束，试差法。

教学方式安排

电视教学：6学时。内容如下：

第二讲：物料衡算的基本方法（2·1）：物料衡算的通用关系式（2·1·1），各种物流组成的换算关系（2·1·2）；

第三讲：各种物流组成的换算关系（2·1·2续），物料衡算的基本步骤（2·1·3），简单物理过程的物料衡算（2·2）；基本单元（2·2·1），不含相平衡关系约束的简单物理过程的物料衡算（2·2·2）；

第四讲：不含相平衡关系约束的简单物理过程的物料衡算（2·2·2续），物理过程物料衡算的自由度分析（2·1·4）；

第五讲：有相平衡关系约束的物理过程的物料衡算（2·2·3）；

第六讲：有相平衡关系约束的物理过程的物料衡算（2·2·3续），多单元物理过程的物料衡算（2·3）；多单元过程物料衡算的特点（2·3·1），带循环、排放和旁路过程的物料衡算（2·3·2）；

第七讲：带循环、排放和旁路过程的物料衡算（2·3·2续），多单元过程物料衡算的一些解题技巧（2·3·3）。

面授教学：解题指导，1学时

本章作业：1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14。

学习提要

物料衡算是化工工艺过程计算的基础,本章学习物料衡算的基本概念和方法。

一、物料衡算的基本方法

1. 物料衡算的通用关系式

物料与能量守恒定律的一般表达式为:

$$\begin{aligned} & \text{〔进入系统的量〕} - \text{〔离开系统的量〕} \\ & = \text{〔系统中累积的量〕} \end{aligned}$$

物料衡算按使用的物理量的不同而有质量衡算和物质的量衡算(即摩尔衡算)两种基本形式;按衡算内容可分为总物料衡算、组分衡算和元素衡算三种。

(1) 总物料衡算

总质量衡算式:

$$\sum_{i=1}^s G_i = G_{\text{积}}$$

总摩尔衡算式:

$$\sum_{i=1}^s n_i + \Delta n_{\text{生成}} = n_{\text{积}}$$

对于物理过程, $\Delta n_{\text{生成}} = 0$, 上式变为

$$\sum_{i=1}^s n_i = n_{\text{积}}$$

对于定常过程, $G_{\text{积}} = 0$, $n_{\text{积}} = 0$, 总物料衡算式变为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^s G_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^s n_i + \Delta n_{\text{生成}} &= 0 \end{aligned}$$

(2) 组分衡算

① 物理过程

质量衡算式: $\sum_{i=1}^s G_{ij} = G_{\text{积},j} \quad (j=1, 2, \dots, k)$

或 $\sum_{i=1}^s G_i w_{ij} = G_{\text{积},j} \quad (j=1, 2, \dots, k)$

摩尔衡算式: $\sum_{i=1}^s n_{ij} = n_{\text{积},j} \quad (j=1, 2, \dots, k)$

或 $\sum_{i=1}^s n_{ij} \cdot x_{ij} = n_{\text{积},j} \quad (j=1, 2, \dots, k)$

对定常过程, 上面四式中的 $G_{\text{积},j}$ 和 $n_{\text{积},j}$ 均等于零。

将组分衡算式加和可得到总物料衡算式, 因此对于含有 k 个组分的系统, 在列出的 $k+1$ 个物料衡算式中只有 k 个是独立的。

② 化学反应过程

质量衡算式: $\sum_{i=1}^s G_{ij} + \Delta G_{\text{生成},j} = G_{\text{积},j} \quad (j=1, 2, \dots, k)$

摩尔衡算式: $\sum_{i=1}^s n_{ij} + \Delta n_{\text{生成},j} = n_{\text{积},j} \quad (j=1, 2, \dots, k)$

对于定常过程, 上面二式中的 $G_{\text{积},j}$ 和 $n_{\text{积},j}$ 均等于零。

(3) 元素衡算

质量衡算式: $\sum_{i=1}^s G_{ie} = G_{\text{积},e} \quad (e=1, 2, \dots, E)$

或 $\sum_{i=1}^s G_i w_{ie} = G_{\text{积},e} \quad (e=1, 2, \dots, E)$

摩尔衡算式: $\sum_{i=1}^s n_{ie} = n_{\text{积},e} \quad (e=1, 2, \dots, E)$

或 $\sum_{i=1}^s n_i x_{ie} = n_{\text{积},e} \quad (e=1, 2, \dots, E)$

对于定常过程, 上面四式右边的 $G_{\text{积},e}$ 和 $n_{\text{积},e}$ 均等于零。

由元素衡算可知:

(1) 将元素衡算式加和可得到总物料衡算式, 因此进行物料衡算时在列出的 E 个元素衡算式和 1 个总物料衡算式中只有 E 个是独立的。

(2) 因元素在化学反应中不发生变化, 采用元素衡算可不考虑由于化学反应引起的组分变化, 因而元素衡算适合于化学反应过程的物料衡算。但物料中元素数常小于组分数, 因此由元素衡算得到的信息比组分衡算少, 故物理过程一般采用组分衡算。

(3) 元素衡算式中的 n_i 是以元素原子为基本粒子计算的物质摩尔数, 与组分衡算式中以组分分子为基本粒子计算的物流摩尔数 n_i 并不相同。

在使用以上总物料衡算、组分衡算和元素衡算通式时, 还要注意以下几点:

(1) 在一定时间内进出系统的某物流或其中某组分、某元素的质量或摩尔数均以进入系统者取正值, 离开系统者取负值。

(2) 一定时间内系统内物料的质量积累 (或积累速率) 和物质的量积累 (或积累速率) 均以此积累量增加时取正值, 减少时取负值, 对定常过程则为零。

(3) $\Delta n_{\text{生成}}$ 、 $\Delta n_{\text{生成},j}$ 及 $\Delta G_{\text{生成},j}$ 表示在一定时间内由于化学反应生成的总物料摩尔数、组分 j 摩尔数和组分 j 的质量, 有净的生成时取正值, 有净的减少时取负值, 对物理过程则为零。

(4) 总物料衡算与组分衡算对物理过程和化学反应过程均适用, 元素衡算一般用于化学反应过程。

(5) 总物料衡算式、组分衡算式和元素衡算式都是物流量的齐次方程, 因此方程中各项的流量可同时扩大或缩小若干倍而不影响其它未知量的值, 因而物料衡算计算基准的选取具有任意性, 选得恰当将使计算简便。

(6) 对于间歇过程, 若只需了解每一操作周期中投入原料和输出产品的数量和组成时, 因在一个操作周期内没有物料的积累, 可以一个操作周期的物料处理量为计算基准, 将投入和输出的物料分别作为进入和离开系统的物流, 即将过程当作定常过程列出物料衡算式求解。

总物料衡算、组分衡算见主教材例 2-1、例 2-2、例 2-3。

2. 各种物流组成的换算

各种物流组成的定义式见本书第一章。进行物料衡算时应注意以下几点:

(1) 应在理解各物流组成定义的基础上导出其换算关系, 不必死记换算公式。

(2) 换算时可取 1 或 100 单位 (kmol 、 kg 或 m^3) 的物料量为计算基准, 以使计算简化。

(3) 干基组成与湿基组成的换算, 实际上是摩尔比 (或质量比) 与摩尔分数 (或质量分数) 间的换算。换算时可采用公式法或列表法, 应注意组成和单位的一致性。

(4) 计算结果可用组成归一性方程检验。

组成换算参看主教材例 2-4、例 2-5。

3. 物料衡算的基本步骤

物料衡算包括以下步骤:

- (1) 分析题意, 确定已知量和未知量;
- (2) 收集计算所需数据;
- (3) 画出流程草图;
- (4) 选择计算基准;
- (5) 选择衡算系统, 列出独立的物料衡算式;
- (6) 求解物料衡算式, 必要时与能量衡算式联立求解;
- (7) 检验计算结果;
- (8) 用衡算表或衡算图表示计算结果。

4. 物料衡算的自由度分析

自由度是为了唯一地确定体系的状态必须规定其数值的相互独立的物理量数目, 也就是为了完全确定系统状态所需确定的设计变量数。自由度 N_f 等于全部独立变量数 N_v 与全部独立约束数 N_r 之差: $N_f = N_v - N_r$ 。

自由度分析的目的是为了判断方程求解的可能性, 对多单元过程可用来分析适宜的解题步骤。当 $N_f = 0$ 时, 系统物料衡算有唯一解; 当 $N_f > 0$ 时, 无确定解, 需对 N_f 个设计变量赋值, 使自由度为零才有确定解; 当 $N_f < 0$ 时, 数学上可能无解或出现矛盾解, 表示某些约束不是独立约束或有些变量未考虑到, 应剔出非独立约束和计入全部变量再求解。对多单元过程, 应先从自由度为零的单元开始求解; 随着这一单元的求解, 与之有联系的单元的自由度将随之减少, 故可能实现顺序求解。

自由度分析时应注意以下几点:

(1) N_v 和 N_r 的内容随研究对象和范围的不同而不同。对不存在相平衡关系的物理过程, N_v 包括各股物流的物流量和独立组成, $N_v = \sum k_i$; N_r 包括衡算约束和约定约束, 衡算约束数即系统的独立衡算方程数, 应等于系统的组分数, 约定约束数包括给定的已知物流条件数, 如给定的流量、组成、流量比、组成比等。在涉及相平衡计算时, N_v 中有时应包括相平衡过程的温度和压力, 这时约定约束中应包括已知的温度和压力; 另外 N_r 中还应包括相平衡关系约束, 它等于相平衡组分数。

(2) 由于在确定物料衡算的物流独立变量时已经考虑了组成的归一性, 故组成归一性方程不再列入独立约束中。

(3) 在 N_v 和 N_r 中变量和约束必须是独立的。

(4) 自由度分析只指出需要设定数值的变量数目, 并没有说明设定哪些变量和如何设定其数值。在给变量赋值时应尽量设定这样的变量, 这些变量被赋值后衡算过程能逐步顺序求解而避免联立求解。设定这些变量数值后使自由度变为零, 只能说明该问题有确定的解, 至于此解是否合理, 要看此解是否有物理意义和工程上实现的可能性与合理性, 另外所得的解还应使过程达到最优化。

自由度分析可用列表法计算, 见主教材例 2-6、例 2-7 与例 2-8。

二、简单物理过程的物料衡算

1. 基本单元

简单过程是只包括一个单元的过程。简单物理过程总可看作是通过单元、混合单元、分

割单元与分离单元等四种最基本单元的某种组合。

(1) 通过单元 该单元只有一股物流流过且其流量和组成都不发生变化。若进出系统物流的组分数为 k ，则 $N_v=2k$ ，而 $N_r=k$ ，故此单元的自由度 $N_f=N_v-N_r=k$ 。

(2) 混合单元 是将两股物流混合成一股物流的操作单元。系统物流数 $s=3$ ，若总组分数为 k ，则 $N_v=\sum k_i=k_1+k_2+k_3=k_1+k_2+k$ ， $N_r=k$ ，故 $N_f=N_v-N_r=k_1+k_2$ 。

(3) 分割单元 是将一股物流分割成两股组成相同物流的操作单元。此时 $k_1=k_2=k_3=k$ ， $N_v=3k$ ，独立衡算约束数为 k ，独立组成约束数为 $k-1$ ，因此 $N_r=2k-1$ ，故 $N_f=N_v-N_r=k+1$ 。

(4) 分离单元 是将一股物流分离成组成各异物流的操作单元。当不存在相平衡关系时， $N_v=k_1+k_2+k_3$ ， $N_r=k_1$ ，故 $N_f=N_v-N_r=k_2+k_3$ 。

2. 不含相平衡关系的物料衡算

不含相平衡关系的物料衡算常用公式法求解。对于含有 k 个组分的系统共可列出 k 个组分物料衡算式和 1 个总物料衡算式，其中只有 k 个是独立的。也可采用逻辑顺序法求解，即按题意逐步分析求解。这两种解法见主教材例 2-9、例 2-10 与例 2-11。

在进行这种类型物料衡算时应注意以下问题：

(1) 在用公式法求解时，应先就未知量最少的方程求解，尽量按顺序直接求解；如不能直接顺序求解，则采用联立消去法和变量迭代法求解，当线性方程组很庞大时，可按矩阵算法程序用计算机求解。

(2) 尽量选用联系组分列方程求解，可使计算过程简便。

(3) 有些独立约束要从过程物理现象和限制条件的分析中发现。

例 2-1 一精馏塔的进料流量为 1000kg/h ，组成（质量%）为：苯 60%，甲苯 25%，二甲苯 15%。精馏塔顶馏出物的组成（质量%）为：苯 94%，甲苯 3.5%，二甲苯 2.5%。塔底产物中的二甲苯占进料二甲苯的 95%。求馏出物、塔底产物的流量和塔底产物的组成。

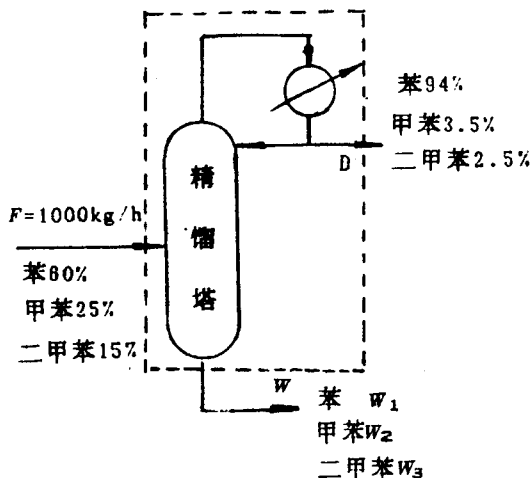
解 先画出物料衡算示意图。塔顶产物、塔底产物流量及塔底产物中苯、甲苯、二甲苯流量分别用 D 、 W 、 W_1 、 W_2 、 W_3 表示。

自由度分析：本题 $s=3$ ， $k=3$ ， $N_v=\sum k_i=3+3+3=9$ 。独立衡算约束数 $=k=3$ ，已知独立组成数对进口物流和馏出液均是 2，已知流量和流量关系数为 2，故 $N_r=3+2+2+2=9$ ， $N_f=N_v-N_r=9-9=0$ ，故问题有确定解。

取 $F=1000\text{kg/h}$ 为计算基准，可列出物料衡算方程求解：

$$\text{苯平衡：} 1000 \times 0.6 = 0.94D + W_1 \quad (1)$$

$$\text{甲苯平衡：} 1000 \times 0.25 = 0.035D + W_2 \quad (2)$$



例 2-1 附图

二甲苯平衡：1000×0.15=0.025D+W₃ (3)

由题意知存在如下约束关系：

$$W_3=1000\times 0.15\times 0.95 \tag{4}$$

由式 (4)、(3)、(2)、(1) 可顺序解得：

$$W_3=142.5\text{kg/h}, D=300\text{kg/h}$$

$$W_2=239.5\text{kg/h}, W_1=318\text{kg/h}$$

$$\therefore W=W_1+W_2+W_3=318+239.5+142.5=700\text{kg/h}$$

故可求出塔底产物的组成为

$$w_1=\frac{318}{700}=0.454=45.4\%$$

$$w_2=\frac{239.5}{700}=0.342=34.2\%$$

$$w_3=\frac{142.5}{700}=0.204=20.4\%$$

由总物料衡算式校核：

$$D+W=300+700=1000\text{kg/h}=F$$

故计算正确

物料衡算结果列表如下：

例 2-1 附表

组 分	输 入		输 出			
			馏出物		塔底产品	
	流量 kg/h	组成 %	流量 kg/h	组成 %	流量 kg/h	组成 %
苯	600.0	60.0	282.0	94.0	318.0	45.4
甲苯	250.0	25.0	10.5	3.5	239.5	34.2
二甲苯	150.0	15.0	7.5	2.5	142.5	20.4
各物流合计	1000.0	100.0	300.0	100.0	700.0	100.0
输入、输出流量合计	1000.0		1000.0			

由本例可见：

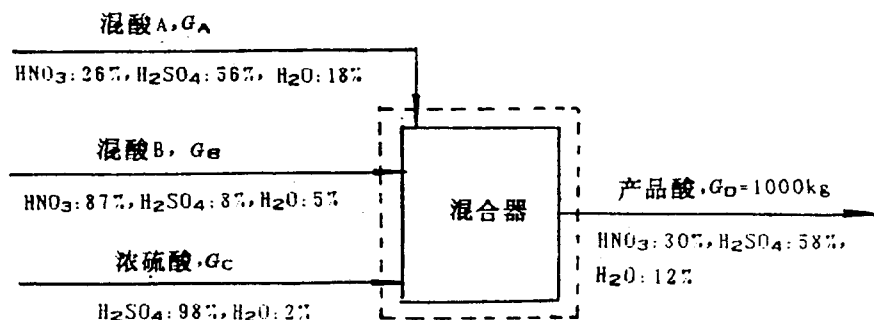
(1) 本题只采用了组分衡算，也可用总物料衡算式代替式 (1) 或式 (2)。

(2) 本题先计算塔底产物中各组分流量再求该物流的组成，计算较简便。如果直接计算塔底产物组成，则因组分衡算式中出现两未知量的乘积项 $\dot{W}w_j$ ，计算较繁琐。

例 2-2 由组成为 26% HNO_3 、56% H_2SO_4 、18% H_2O 的混酸 A，组成为 87% HNO_3 、8% H_2SO_4 、5% H_2O 的混酸 B 和 98% 浓硫酸调整得到 1000kg 组成为 30% HNO_3 、58% H_2SO_4 、12% H_2O 的混酸 D，需混酸 A、B 和浓硫酸各多少？

解 先画出混合过程的示意图。

自由度分析： $N_v = \sum k_i = 3 + 3 + 2 + 3 = 11$ 。独立衡算方程数等于系统组分数 3，独立组成约束数对四股物流分别为 2，2，1，2，已知物流流量数为 1，故 $N_r = 3 + 1 + 7 = 11$ ， $N_i = N_v - N_r = 11 - 11 = 0$ ，故问题有唯一解。



例 2-2 附图

以产品酸 D 的量 $G_D = 1000\text{kg}$ 作为计算基准，以编号 1，2，3 分别代表 HNO_3 、 H_2SO_4 和 H_2O 。

总物料衡算： $G_A + G_B + G_C = 1000$

HNO_3 衡算： $0.26G_A + 0.87G_B = 0.3 \times 1000$

H_2SO_4 衡算： $0.56G_A + 0.08G_B + 0.98G_C = 0.58 \times 1000$

用消去法联立求解上面三个方程，可解得：

$G_A = 593.6\text{kg}$ ， $G_B = 167.4\text{kg}$ ， $G_C = 239.0\text{kg}$

用另一个组分 (H_2O) 的衡算校核：

$593.6 \times 0.18 + 167.4 \times 0.05 + 239.0 \times 0.02 = 120$

$= G_D \times 0.12 = 1000 \times 0.12 = 120 \text{ (kg)}$

从本例计算可见，当衡算方程组无法逐步顺序求解时，就要联立求解。对于线性方程组，可采用消去法或变量迭代法求解。

3. 有相平衡关系约束的物料衡算

(1) 相平衡的基本标志

- ① 达到平衡时，各组分在两相中的化学位相等，因而各相物流的组成间具有一定关系。
- ② 各相的温度和压力相等。

(2) 相平衡关系

对单组分的气液相平衡，平衡时气相中该组分的分压等于它在系统温度下的饱和蒸汽压：

$$p_j = p_j^*$$

若气相可看作理想气体，该组分在气相中的摩尔分率为

$$y_j = \frac{p_j}{p}$$

对于多组分的相平衡，平衡时组分 j 在两相内的组成具有如下关系：

$$X_{Bj} = K_j X_{cj}$$