

# 化工原理 示例与练习

丛德滋 方图南 编

华东化工学院出版社

# 化工原理示例与练习

丛德滋 方图南 编

华东化工学院出版社

## 内 容 提 要

本书以示范例题和习题的形式,把《化工原理》课程中的基本概念、重要观点和工程处理方法系统地加以再现,而且选择的题目来自生产实践,具有真实性。在每道示范例题后面都加以小结和说明,能使读者加深对基本概念、原理和处理方法的理解,提高理论联系实际的能力。本书中例题和习题的内容包括:流体流动、流体输送机械、流体通过颗粒层的流动、颗粒的沉降和流态化、传热、气体蒸发、液体吸收、精馏、液-液萃取、热质同时传递的过程以及干燥等11章。涉及的内容全系常用的单元操作,因此可和各种版本的《化工原理》教材配套使用,可作为大专院校教材、教学参考书,也可供从事化工生产、设计及科研人员参考。

责任编辑 朱祖莹

责任校对 金慧娟

封面设计 马庆成

### 化 工 原 理 示 例 与 练 习

Huagongyuanli Shili yu Lianxi

丛德滋 方图南 编

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路130号)

新华书店上海发行所发行

浙江鄞县文教印刷一厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 23.25 字数 564 千字

1988年3月第一版 1988年3月第一次印刷

印数 1—15000 册

ISBN 7-5628-0001-4/TQ.1 定价:5.50元

## 前 言

化工原理是高等院校化工类各专业必修的一门骨干课程，做习题是学生掌握本门课程的基本理论、基本思想及基本方法的重要学习环节，因此，在教学过程中如何精选习题、以什么样的示范例题来指导学生解题，这对于提高本课程的教学质量和学生学习的效率是至关重要的。为此，作者根据化工原理课程的教学要求、结合多年来教学实践的经验，编写了《化工原理示例与练习》。

本书中所拟定的例题和练习题与传统的化工原理习题相比，有较大的改变，并且有以下两个明显的特点：

(1) 加强了题目的思想性，使学生在解题过程中加深对基本教学内容的理解。本书根据陈敏恒教授主编的《化工原理》中的主导思想，通过大量的示范例题和练习题，以数学的形式将本课程的基本概念和重要观点系统地加以再现。这样，可使学生每看一个例题或解一道习题都能从中悟出一定的道理，或加深理解某个基本概念，或验证某个重要观点，或掌握某种工程处理方法。

(2) 加强了题目的真实性，使解题过程成为学生在校学习期间进行理论联系实际的一个重要途径。本书中拟定的示范例题和练习题具有一定的代表性和广度，力求能反映工作和生产中可能出现的各种丰富多采的实际情况，通过例题的示范和习题的练习使学生能体察到生产实际的主要方面。

本书中例题和习题的内容包括：流体流动、流体输送机械、流体通过颗粒层的流动、颗粒的沉降与流态化、传热、蒸发、吸收、精馏、萃取、热质同时传递和干燥等，共11章，其中示范例题265题，练习题269题。由于涉及的内容全部是一些常用的单元操作，因此本书也可和各种版本的《化工原理》教材配套使用，可作为高等院校有关专业的教材和教学参考书。对于从事化工生产、设计和科研的人员，本书也有一定的参考价值。

本书在编写过程中承蒙陈敏恒教授的具体指导，并得到华东化工学院化工原理教研组广大教师的帮助和支持，特此表示衷心的感谢。

限于水平，本书的缺点、错误一定还有不少，恳切地希望广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

<b>第一章 流体流动</b> .....	( 1 )
[例1.1] 基本因次与因次系统 .....	( 1 )
[例1.2] 同一因次系统的单位换算 .....	( 2 )
[例1.3] 不同因次系统的单位换算 .....	( 3 )
[例1.4] 经验关系式的单位换算 .....	( 4 )
[例1.5] 混和液体的密度 .....	( 5 )
[例1.6] 混和气体的密度 .....	( 5 )
[例1.7] 混和液体的粘度 .....	( 6 )
[例1.8] 混和气体的粘度 .....	( 7 )
[例1.9] 静压强与浮力 .....	( 7 )
[例1.10] 比重计的设计原理 .....	( 8 )
[例1.11] 容器壁面的受力 .....	( 8 )
[例1.12] 液封高度的计算 .....	( 9 )
[例1.13] 流向的判断 .....	( 9 )
[例1.14] 远距离液位测量 .....	( 11 )
[例1.15] 普通U形管压强计 .....	( 11 )
[例1.16] 单杯式压强计 .....	( 12 )
[例1.17] 复式压强计 .....	( 13 )
[例1.18] 双液杯式微压机 .....	( 14 )
[例1.19] 管道两点之间压差的测量 .....	( 15 )
[例1.20] 倒U形管压差计 .....	( 15 )
[例1.21] 两容器间压差的测量 .....	( 16 )
[例1.22] 气体的平衡 .....	( 16 )
[例1.23] 液体管路各断面平均流速相对大小的不变性 .....	( 17 )
[例1.24] 气体管路各断面质量流速相对大小的不变性 .....	( 17 )
[例1.25] 管内流动的平均流速 .....	( 18 )
[例1.26] 理想流体在管内流动时的能量转换 .....	( 19 )
[例1.27] 流体在管内的汽化 .....	( 20 )
[例1.28] 容器内液体的排放 .....	( 20 )
[例1.29] 简易恒速装置 .....	( 21 )
[例1.30] 阻力损失与势能的消耗 .....	( 22 )
[例1.31] 管流的特点与管内流体压强的变化 .....	( 23 )
[例1.32] 高位槽的最大流出量 .....	( 25 )

[例1.33]	由局部阻力损失引起的管内汽化	( 26 )
[例1.34]	虹吸管顶部的最大安装高度	( 27 )
[例1.35]	无外加功流体输送管路的流量调节	( 27 )
[例1.36]	喷嘴的尺寸与喷出速度	( 29 )
[例1.37]	多层封闭容器内的流动	( 30 )
[例1.38]	流化床的压降	( 30 )
[例1.39]	流体对固体边界的作用力	( 31 )
[例1.40]	流体在环隙内作层流流动的速度分布与阻力损失	( 32 )
[例1.41]	流动形态判据的确定	( 33 )
[例1.42]	根据无因次变量进行模拟实验	( 34 )
[例1.43]	无因次经验关联式与普通经验式的区别	( 35 )
[例1.44]	无外加功简单输送管路计算问题的自由度	( 36 )
[例1.45]	水塔高度和管路直径的计算	( 37 )
[例1.46]	在一定势能差下管路输送能力的计算	( 38 )
[例1.47]	在规定流量下管路所需势能差的计算	( 39 )
[例1.48]	管路流量与所需势能差的关系	( 39 )
[例1.49]	流体粘度对管路输送能力的影响	( 40 )
[例1.50]	流体的温度对管路输送能力的影响	( 41 )
[例1.51]	支管阻力为主的分支管路	( 42 )
[例1.52]	总管阻力为主的分支管路	( 43 )
[例1.53]	使用同一水源各用户间的相互影响	( 44 )
[例1.54]	并联管路的流量分配	( 45 )
[例1.55]	提高流量分配均匀性的代价	( 46 )
[例1.56]	真空管路直径的计算	( 47 )
[例1.57]	设备漏气对真空度的影响	( 48 )
[例1.58]	长距离气体输送管路的计算	( 48 )
[例1.59]	非圆形管道内流量的测量	( 49 )
[例1.60]	孔板的能量损失	( 50 )
[例1.61]	孔板流量计的测量范围	( 52 )
[例1.62]	转子流量计的刻度换算	( 53 )
[例1.63]	转子流量计的切削	( 53 )
练习一		( 54 )

## 第二章 流体输送机械 ( 65 )

[例2.1]	旋转液体中的压强分布	( 65 )
[例2.2]	流体压强沿叶片通道的变化	( 66 )
[例2.3]	叶片形状对理论压头的影响	( 67 )
[例2.4]	输送管路对外加功的需求	( 68 )
[例2.5]	泵在循环管路中的压头与功率	( 70 )

[例2.6]	泵在分支管路中的压头与功率	(71)
[例2.7]	根据输送任务确定管径与相应的离心泵	(71)
[例2.8]	根据输送任务和已有离心泵决定管径	(73)
[例2.9]	离心泵的实际工作点	(74)
[例2.10]	用阀门调节管内流量的能耗	(76)
[例2.11]	切削叶轮与关小阀门的能耗比较	(77)
[例2.12]	流体密度对管路的影响	(79)
[例2.13]	气体密度对风机流量的影响	(80)
[例2.14]	离心泵组合方式的选择	(81)
[例2.15]	多台离心泵的并联组合	(83)
[例2.16]	液体种类对泵的允许安装高度的影响	(84)
[例2.17]	在循环管路中防止汽蚀现象的措施	(85)
[例2.18]	离心泵的 $H_{max}$ 和 $\Delta h_{in}$ 的实验测定	(86)
[例2.19]	正位移泵的流量调节	(87)
练习二		(88)

### 第三章 流体通过颗粒层的流动 (92)

[例3.1]	颗粒尺寸对颗粒床内流动的影响	(92)
[例3.2]	空隙率 $\varepsilon$ 对床层内流动的影响	(93)
[例3.3]	根据压降计算式从已知工况推算未知工况	(94)
[例3.4]	利用压降计算式指导实验测定	(95)
[例3.5]	恒速过滤时压差随时间的变化	(96)
[例3.6]	等压过滤时过滤速率随时间的变化	(97)
[例3.7]	间歇过滤机的生产能力	(98)
[例3.8]	所需过滤面积的计算	(99)
[例3.9]	操作方式对过滤机生产能力的影响	(100)
[例3.10]	压差与温度对过滤操作的影响	(102)
[例3.11]	根据操作数据反算过滤常数	(103)
[例3.12]	回转真空过滤机的设计型计算	(104)
[例3.13]	回转真空过滤机的操作型计算	(105)
练习三		(105)

### 第四章 颗粒的沉降和流态化 (108)

[例4.1]	颗粒尺寸对沉降速度的影响	(108)
[例4.2]	颗粒形状对沉降速度的影响	(108)
[例4.3]	流体温度对沉降速度的影响	(110)
[例4.4]	液体粘度的测定	(111)
[例4.5]	小液滴在液体中的浮升与滞留	(111)
[例4.6]	颗粒分级器各级容器直径的确定	(112)

[例4.7]	小颗粒的下降速度随时间的变化	(114)
[例4.8]	降尘室所需面积的计算	(115)
[例4.9]	降尘室出口气体含尘量的计算	(116)
[例4.10]	气体温度对降尘室生产能力的影响	(117)
[例4.11]	降尘室放置角度对生产能力的影响	(118)
[例4.12]	流化床与固定床压降的比较	(119)
[例4.13]	起始流化速度的实验测定	(120)
[例4.14]	流化床直径的计算	(121)
[例4.15]	流化床反应器催化剂损失量的计算	(121)
练习四		(122)
<b>第五章 传热</b>		<b>(125)</b>
[例5.1]	导热总温差在多层壁内的分配	(125)
[例5.2]	导热系数随温度的变化及其平均值	(126)
[例5.3]	球形壁内的定态一维热传导	(127)
[例5.4]	导热系数的简易测定	(127)
[例5.5]	有内热源的一维定态热传导	(128)
[例5.6]	给热系数与传热温度差的关系	(130)
[例5.7]	物性对管内给热系数的影响	(130)
[例5.8]	流速对管内给热系数的影响	(131)
[例5.9]	管径对管内给热系数的影响	(132)
[例5.10]	非圆形管道的给热系数	(132)
[例5.11]	流体的流动形态对给热系数的影响	(133)
[例5.12]	自然对流所引起的热损失	(134)
[例5.13]	大容积饱和沸腾给热系数经验表达式的应用	(135)
[例5.14]	传热面的方位对冷凝给热系数的影响	(136)
[例5.15]	液膜流动状态对给热系数的影响	(136)
[例5.16]	壁温的计算	(137)
[例5.17]	保温材料的合理使用	(137)
[例5.18]	保温层的临界半径	(139)
[例5.19]	小球表面给热系数的测定	(140)
[例5.20]	空心容器壁上小孔的辐射能力	(141)
[例5.21]	黑度的实验测定	(142)
[例5.22]	热辐射所引起的热损失	(142)
[例5.23]	遮热板的黑度与数目对隔热效果的影响	(143)
[例5.24]	以恒热流方式加热的蒸发设备的飞温	(144)
[例5.25]	气体温度的测量误差	(145)
[例5.26]	保温瓶内热水的冷却	(146)
[例5.27]	对数平均推动力的特性	(146)



[例5.28]	逆流与并流操作时最小载热体用量的比较	(147)
[例5.29]	冷凝冷却器所需传热面积的计算	(148)
[例5.30]	传热过程的调节	(149)
[例5.31]	热阻较小侧流体的流量变化对传热过程的影响	(150)
[例5.32]	热阻较大侧流体的流量变化对传热过程的影响	(152)
[例5.33]	换热器的传热能力与载热体用量的关系	(153)
[例5.34]	换热器的调节余地	(155)
[例5.35]	换热器给热系数的实验测定	(157)
[例5.36]	换热器污垢热阻的计算	(158)
[例5.37]	换热器逆流操作与并流操作的比较	(158)
[例5.38]	载热体再循环对传热过程的影响	(159)
[例5.39]	搅拌在传热过程中的作用	(160)
[例5.40]	复杂流型传热过程的计算	(162)
[例5.41]	换热器的串联组合	(163)
[例5.42]	换热器的并联组合	(165)
[例5.43]	流体分布不均对并联换热器组传热能力的影响	(166)
[例5.44]	间歇传热过程的计算	(167)
[例5.45]	非定态流体温度的测量误差	(168)
[例5.46]	连续搅拌槽内液体温度随加热时间的变化	(169)
练习五		(170)
<b>第六章 蒸发</b>		(176)
[例6.1]	溶液沸点升高的估算	(176)
[例6.2]	液体静压所造成的温差损失	(178)
[例6.3]	单效蒸发过程所需传热面积的计算	(179)
[例6.4]	蒸发器操作时原料状态的变化对完成液浓度的影响	(180)
[例6.5]	蒸发过程的调节	(181)
[例6.6]	物料结垢的影响与传热系数的测定	(183)
[例6.7]	单效与多效蒸发过程的比较	(184)
[例6.8]	多效蒸发并流和逆流操作的比较	(187)
[例6.9]	额外蒸汽的引出	(191)
[例6.10]	蒸发器操作周期的确定	(193)
练习六		(194)
<b>第七章 气体吸收</b>		(196)
[例7.1]	亨利定律各系数之间的换算	(196)
[例7.2]	温度和压强对各亨利系数的影响	(196)
[例7.3]	加热解吸的热量消耗	(197)
[例7.4]	吹气解吸的气体用量	(198)

[例7.5]	挥发性固体小球的升华速率	(199)
[例7.6]	相平衡对两相传质推动力及其分配的影响	(201)
[例7.7]	流体的流量对传质阻力的影响	(202)
[例7.8]	吸收剂用量对气体极限残余浓度的影响	(204)
[例7.9]	逆流与并流操作最小吸收剂用量	(204)
[例7.10]	吸收塔逆流操作与并流操作的比较	(205)
[例7.11]	吸收塔高的计算	(206)
[例7.12]	吸收剂再循环对所需塔高的影响	(209)
[例7.13]	溶质回收率对返混的敏感程度	(210)
[例7.14]	相平衡对返混实际结果的影响	(211)
[例7.15]	吸收剂用量对传质系数的影响	(213)
[例7.16]	溶质回收率与所需塔高的关系	(213)
[例7.17]	解吸塔高的计算	(214)
[例7.18]	传质阻力较小侧流体的流量变化对吸收过程的影响	(216)
[例7.19]	气体残余浓度与吸收剂用量的关系	(217)
[例7.20]	循环吸收剂用量对吸收操作的影响	(218)
[例7.21]	吸收剂入口温度对吸收过程的影响	(220)
[例7.22]	吸收剂初始浓度对吸收过程的影响	(221)
[例7.23]	提高回收率的代价	(222)
[例7.24]	流体分布不均匀对并联吸收塔操作的影响	(224)
[例7.25]	气液流动方式对吸收过程的影响	(226)
[例7.26]	液相完全混和与气液错流接触操作情况的比较	(227)
[例7.27]	两股气体混和进料与单独进料残余浓度的比较	(228)
[例7.28]	吸收塔的组合	(230)
[例7.29]	吸收塔理论板数的计算	(232)
[例7.30]	高浓度气体的吸收	(234)
练习七		(236)

## 第八章 液体精馏 (242)

[例8.1]	混合液泡点与压强的对应关系	(242)
[例8.2]	总压对相对挥发度的影响	(242)
[例8.3]	相对挥发度沿塔高的变化	(243)
[例8.4]	惰性气体对相平衡的影响	(244)
[例8.5]	可凝性混合气体露点的计算	(246)
[例8.6]	平衡蒸馏与简单蒸馏的比较	(247)
[例8.7]	操作压强对平衡蒸馏的影响	(248)
[例8.8]	理论板数的计算	(249)
[例8.9]	回流温度对所需理论板数的影响	(251)
[例8.10]	加料热状态对所需理论板数的影响	(252)

[例8.11]	物料衡算对精馏过程的约束	(255)
[例8.12]	产品纯度与最小回流比的对应关系	(256)
[例8.13]	原料组成对最小回流比的影响	(258)
[例8.14]	复杂塔最小回流比的计算	(258)
[例8.15]	加料热状态对所需最低能耗的影响	(260)
[例8.16]	组成不同的物料混合进塔与单独进塔所需理论板数的比较	(262)
[例8.17]	直接蒸汽与间接蒸汽加热所需理论板数的比较	(263)
[例8.18]	设有部分冷凝器的精馏塔理论板数的计算	(264)
[例8.19]	具有中间换热器的精馏塔理论板数的计算	(265)
[例8.20]	塔釜伴有化学反应的精馏塔理论板数的计算	(267)
[例8.21]	回收塔所需理论板数的计算	(268)
[例8.22]	精馏塔内的温度分布	(269)
[例8.23]	馏出率( $D/F$ )与产品组成( $x_D$ )的关系	(271)
[例8.24]	实际回流比与产品组成的关系	(272)
[例8.25]	精馏塔的调节	(274)
[例8.26]	物料衡算关系对精馏塔调节的作用	(276)
[例8.27]	产品纯度及回收率与能耗的关系	(276)
[例8.28]	加料板位置对能耗的影响	(278)
[例8.29]	中间换热对精馏过程能耗的影响	(279)
[例8.30]	组成不同的料液的加料方式对能耗的影响	(281)
[例8.31]	间歇精馏与连续精馏所需能的比较	(283)
[例8.32]	默弗里板效率与总塔效率的区别	(285)
练习八		(287)

## 第九章 液-液萃取 (292)

[例9.1]	物料衡算与杠杆定律	(292)
[例9.2]	互溶度对萃取分离效果的影响	(293)
[例9.3]	分配系数对溶剂比的影响	(294)
[例9.4]	单级萃取的操作范围	(295)
[例9.5]	单级萃取与多级萃取的比较	(296)
[例9.6]	逆流与错流萃取的比较	(298)
[例9.7]	萃余相组成与最小溶剂比的对应关系	(299)
[例9.8]	溶剂组成对最小溶剂比的影响	(301)
[例9.9]	逆流萃取所需理论级数的计算	(301)
[例9.10]	萃取过程的调节	(304)
[例9.11]	溶剂初始组成对萃取操作的影响	(306)
[例9.12]	浓度不同的料液混合进料与单独进料的比较	(307)
[例9.13]	回流萃取的最小回流比	(308)
[例9.14]	回流萃取所需理论级数的计算	(311)

[例 9.15]	完全不互溶物系的逆流萃取	(312)
[例 9.16]	模拟逆流萃取的实验方法	(314)
练习九		(315)
<b>第十章</b>	<b>热质同时传递的过程</b>	<b>(318)</b>
[例 10.1]	用干湿球温度计测定空气湿含量	(318)
[例 10.2]	热水出口温度与凉水塔最小气液比的对应关系	(318)
[例 10.3]	凉水塔的极限出口温度	(320)
[例 10.4]	凉水塔高度的计算	(321)
[例 10.5]	气体的增湿	(323)
[例 10.6]	空气状态对凉水塔操作的影响	(325)
[例 10.7]	气液比对凉水塔操作的影响	(326)
[例 10.8]	两相温度和水汽分压沿塔高的分布	(328)
练习十		(330)
<b>第十一章</b>	<b>干燥</b>	<b>(331)</b>
[例 11.1]	湿空气状态参数的计算	(331)
[例 11.2]	空气湿度的测定	(332)
[例 11.3]	温度对湿空气容纳水分能力的影响	(332)
[例 11.4]	总压对空气容纳水分能力的影响	(333)
[例 11.5]	湿空气的混合	(334)
[例 11.6]	热损失对干燥过程的影响	(335)
[例 11.7]	气体的出口状态与干燥过程所需能耗的关系	(337)
[例 11.8]	空气预热温度对干燥过程所需能耗的影响	(339)
[例 11.9]	废气再循环	(339)
[例 11.10]	干燥气体的中间加热	(341)
[例 11.11]	料层厚度对干燥过程的影响	(342)
[例 11.12]	理想干燥器所需设备容积的计算	(344)
[例 11.13]	空气用量对理想干燥过程的影响	(345)
[例 11.14]	气流干燥器的计算	(346)
练习十一		(349)
<b>练习题答案</b>		<b>(351)</b>

# 第一章 流体流动

## 【例1.1】 基本因次与因次系统

试以基本因次长度(L)、质量(M)、时间(T)和基本因次长度(L)、力(F)、时间(T)分别推导粘度的因次。

解：对于粘性流体一维层流流动方程式为

$$\tau \propto \frac{du}{dy} \quad \text{或} \quad \tau = \mu \frac{du}{dy},$$

式中比例系数 $\mu$ 简称粘度,它与流体种类有关,是流体的性质。根据物理方程式的因次齐次性原理,粘度 $\mu$ 的因次可由下式求出

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{\left[\frac{du}{dy}\right]}。$$

当基本因次为L、M、T时,则

$$[\tau] = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2}, \quad \left[\frac{du}{dy}\right] = \frac{LT^{-1}}{L} = T^{-1},$$
$$[\mu] = \frac{ML^{-1}T^{-2}}{T^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}。$$

当基本因次为L、F、T时,则

$$[\tau] = \frac{F}{L^2} = FL^{-2}, \quad \left[\frac{du}{dy}\right] = T^{-1},$$
$$[\mu] = \frac{FL^{-2}}{T^{-1}} = FL^{-2}T。$$

在任何科学领域和工程领域中,都必须引入若干用来描述研究对象的物理量,同时还要确定度量这些物理量的单位,以使用数字表示它们的大小。

一般地讲,各物理量之间常存在一定的联系,只要选定几个彼此独立的物理量作为基本量,而该领域内其余的物理量皆可通过定义或有关物理定律导出,称为导出量。被选定的基本量的因次称为基本因次,导出量的因次皆可表示成基本因次的某种组合,称为因次式。

基本因次的选择具有一定的任意性。例如,在力学范围内,物理学是选择长度、质量、时间为基本因次(分别以字母L、M、T表示);而工程上则常以长度、力(重量)、时间作为基本因次(分别以L、F、T表示)。

基本因次确定之后,其它各量的因次随之而定,从而形成一定的因次系统。采用这样的因次系统,物理方程式的因次必定是齐次的,即方程式各项具有相同的因次。

### 【例1.2】 同一因次系统的单位换算

试求CGS制与SI粘度单位间的换算关系。

解：在CGS制中，粘度的单位虽不是基本单位，但为了方便却给粘度单位以特定的名称——泊(P)，

$$1 [P] = 1 \frac{\text{dyn}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2}。$$

在SI中，粘度单位无特定名称，其单位是

$$1 [\text{粘度国际单位}] = 1 \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} (\text{或Pa}\cdot\text{s})。$$

在CGS制和SI中，粘度具有相同的因次 $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$ ，两者间的换算关系是

$$1 [P] = 1 \frac{\text{dyn}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2} = 1 \frac{10^{-5}\text{N}\cdot\text{s}}{10^{-4}\text{m}^2} = 0.1 \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} (\text{或}0.1\text{Pa}\cdot\text{s})。$$

单位是度量物理量大小的标准量，同一个物理量可采用不同单位进行度量。在一定的因次系统中，基本量的单位是必须规定的，称为基本单位；而其余各量的单位可根据因次式由基本单位导出，从而形成一定的单位制。

基本因次的不同选择，必将导致不同类型的单位制。常用的单位制可分为两大类。在力学范围内，一类是以长度(L)、质量(M)、时间(T)为基本因次，称为绝对单位制；另一类是以长度(L)、力(F)、时间(T)为基本因次，称为工程单位制。在每一类单位制中，因基本单位的不同规定又衍生出多种具体的单位制。附表中分别列出几种绝对单位制和工程单位制常用的基本单位。

例 1.2 附表1 常用的绝对单位制基本单位

	CGS	MKS	SI	EpS
长 度	厘 米 cm	米 m	米 m	呎 ft
质 量	克 g	公 斤 kg	千 克 kg	磅 lb
时 间	秒 s	秒 s	秒 s	秒 s

例 1.2 附表2 常用的工程单位制基本单位

	米 制	英 制
长 度	米 m	呎 ft
力	公 斤(力) kgf	磅(力) lbf
时 间	秒 s	秒 s

以前，我国在科学领域中多用CGS制，而在工程上多用米制工程单位制。1984年2月国务院公布了“中华人民共和国法定计量单位”并发布了在我国统一实行法定计量单位的命令，因此目前在我国国民经济各部门、文教、科技各部门都已使用法定计量单位。我国的法

定计量单位是以国际单位制(SI)为基础,在国际单位制中以长度(L)、质量(M)、时间(T)电流(I)、热力学温度(Θ)、物质的量(N)、发光强度(J)为基本量,分别以 m、kg、s、A、K、mol、cd为基本单位,在力学范围内,SI与MKS制差不多(见附表)。

由于长期以来,表1和表2所列举的各种单位制同时使用,所以在化学工程中经常碰到以不同单位制表示的各种数据和关系式。另外,为测量不同量级的物理量,对同一因次也往往使用不同单位,例如关于长度就有m、cm、mm、μm等多种单位。因此,在计算之前必须将所有数据加以换算,用统一的单位制表示。

如例1.2所示,对于同一因次系统中不同单位制之间的换算是十分简便的。只要将各基本单位间的数量关系代入物理量的因次式再加以运算,即完成单位换算。

### 【例1.3】 不同因次系统的单位换算

已知水在20℃时,导热系数  $\lambda = 0.6 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$ , 比热容  $c_p = 4.183 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , 粘度  $\mu = 1.004 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 试分别以SI和工程单位制计算数群  $\frac{\mu c_p}{\lambda}$  的数值。

解: 在SI中

$$\frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{1.004 \times 10^{-3} \times 4.183 \times 10^3}{0.6} = 7.0,$$

在工程单位制中, 因为

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.6 \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}} = 0.6 \times \frac{\frac{1}{9.81} \text{kgf}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}} = \frac{0.6}{9.81} \times \frac{\text{kgf}}{\text{s}\cdot\text{K}}, \\ c_p &= 4.183 \times 10^3 \times \frac{\frac{1}{9.81} \text{kgf}\cdot\text{m}}{\frac{1}{9.81} \frac{\text{kgf}\cdot\text{s}^2}{\text{m}} \cdot \text{K}} = 4.183 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2\cdot\text{K}}, \\ \mu &= 1.004 \times 10^{-3} \frac{\frac{1}{9.81} \text{kgf}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}, \\ \frac{\mu c_p}{\lambda} &= \frac{\left( \frac{1.004 \times 10^{-3} \text{kgf}\cdot\text{s}}{9.81 \text{m}^2} \right) \times \left( 4.183 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2\cdot\text{K}} \right)}{\frac{0.6}{9.81} \frac{\text{kgf}}{\text{s}\cdot\text{K}}} = 7.0. \end{aligned}$$

同一物理量在绝对单位制和工程单位制的因次可能是不同的,此时,单位换算应同时保证单位和因次的一致性,故将涉及力和质量的转换。

在常用的国际单位制和工程单位制之间存在以下关系:

$$1 \text{ 公斤(力)} = 9.81 \text{ 牛顿},$$

$$1 \text{ 质量工程单位} = 9.81 \text{ 千克},$$

由例1.3可知,利用这一关系,SI和米制工程单位制之间的换算,根据物理量的因次同样可方便地进行。

### 【例1.4】 经验关系式的单位换算

液体越过平顶堰上的液面高度可用以下经验式计算：

$$h_{ow} = 0.48 \left( \frac{V}{l_w} \right)^{\frac{2}{3}}$$

式中  $h_{ow}$ ——堰上液面高度，in；

$V$  ——液体体积流量，gal/min；

$l_w$  ——堰长，in。

试求流量为  $0.5\text{m}^3/\text{s}$  的液体越过长度为  $2\text{m}$  的平顶堰，堰上液面高度为多少米？

解： 此题可按以下两种方法计算：

方法一： 首先将所有已知量的单位换算成经验式中规定的单位，然后代入经验式并计算结果，最后再将以单位 in 表示的结果换算成以单位 m 表示的结果。

$$V = 0.05 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.05 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \times \frac{264.2 \left( \frac{\text{gal}}{\text{m}^3} \right)}{\frac{1}{60} \left( \frac{\text{min}}{\text{s}} \right)} = 792.6 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

$$l_w = 2\text{m} = 2(\text{m}) \times 39.37 \left( \frac{\text{in}}{\text{m}} \right) = 78.74 \text{ in}$$

$$h_{ow} = 0.48 \left( \frac{V}{l_w} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.48 \times \left( \frac{792.6}{78.74} \right)^{\frac{2}{3}} = 2.24 \text{ in}$$

$$= 2.24(\text{in}) \frac{1}{39.37} \left( \frac{\text{m}}{\text{in}} \right) = 0.057\text{m}$$

方法二： 首先将经验式换算成以国际单位制表示的形式，然后将以 SI 单位表示的已知量直接代入换算后的经验式，便可求得以单位 m 表示的计算结果。此换算过程是先将等式右端诸量换算成原经验式规定的单位（如下式第一方括号所示），然后将以单位 in 表示的计算结果换算成以单位 m 表示。（如下式第二方括号所示），即

$$h_{ow} = 0.48 \left[ \frac{V \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \times \frac{264.2(\text{gal}/\text{m}^3)}{1/60(\text{min}/\text{s})}}{l_w(\text{m}) \times 39.37 \left( \frac{\text{in}}{\text{m}} \right)} \right]^{\frac{2}{3}} \times \left[ (\text{in}) \frac{1}{39.37} \left( \frac{\text{m}}{\text{in}} \right) \right]$$

把式中各换算因子归入系数，可得以国际单位制表示的经验式

$$h_{ow} = 0.664 \left( \frac{V}{l_w} \right)^{\frac{2}{3}}$$

式中  $h_{ow}$  与  $l_w$  的单位为 m， $V$  的单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

将已知量直接代入上式，求得

$$h_{ow} = 0.664 \left( \frac{0.05}{2} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.057\text{m}$$

任何正确的物理关系式都在某种程度上反映各物理量之间的内在联系，其函数形式与所用单位无关。但是，在一些经验关系式中，为了保证关系式的因次齐次性，式中所含系数或



常数往往具有某种因次。通过单位换算，把以某种单位制表示的关系式转换为另一种单位制表示的关系式，其函数形式将不变，而关系式中的系数或常数将会发生变化。

### 【例1.5】 混和液体的密度

已知汽油、轻油、柴油的密度分别为 $700 \text{ kg/m}^3$ 、 $760 \text{ kg/m}^3$ 和 $900 \text{ kg/m}^3$ ，试根据以下条件分别计算此三种油类混和液体的密度：

(1) 汽油、轻油、柴油的质量百分数分别是20%、30%和50%；

(2) 汽油、轻油、柴油的体积百分数分别是20%、30%和50%。

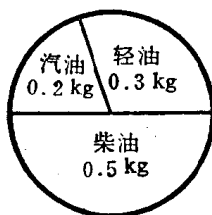
解：(1) 因混和物各组分质量百分数

已知，可取1 kg 混和液体为基准(见附图 a)

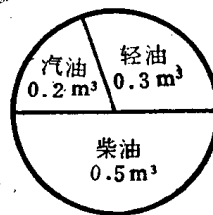
汽油、轻油、柴油的质量分别为0.2 kg、0.3 kg和0.5 kg；

汽油、轻油、柴油的体积分别为 $\frac{0.2}{700} \text{ m}^3$ 、

$\frac{0.3}{760} \text{ m}^3$ 和 $\frac{0.5}{900} \text{ m}^3$ ；



(a)



(b)

例 1.5 附图

根据密度的定义，如忽略各组分混合时的体积效应，则混和液体的密度为

$$\rho_m = \frac{m}{V} = \frac{1}{\frac{0.2}{700} + \frac{0.3}{760} + \frac{0.5}{900}} = 809 \text{ kg/m}^3。$$

(2) 因混和物体积百分数已知，可取 $1 \text{ m}^3$ 体积的(不宜取单位质量)混和液体作为基准(见附图 b)

汽油、轻油、柴油的体积分别为 $0.2 \text{ m}^3$ 、 $0.3 \text{ m}^3$ 和 $0.5 \text{ m}^3$ ；

汽油、轻油、柴油的质量分别为 $700 \times 0.2 \text{ kg}$ 、 $760 \times 0.3 \text{ kg}$ 和 $900 \times 0.5 \text{ kg}$ 。

根据密度定义并忽略混合时的体积效应，可求得混和物的密度为

$$\rho_m = \frac{m}{V} = \frac{700 \times 0.2 + 760 \times 0.3 + 900 \times 0.5}{1} = 818 \text{ kg/m}^3。$$

如果纯组分的密度已知，而且混合时的体积效应可以忽略，那么可以根据体积加和原则计算混和液体的密度。在计算时，应根据已知条件选择适当的基准，使计算简化。

### 【例1.6】 混和气体的密度

某烟道气的组成中，含 $\text{CO}_2$ 为13%、 $\text{H}_2\text{O}$ 为11%、 $\text{N}_2$ 为76%、温度为 $400^\circ\text{C}$ 、压强为 $98.64 \text{ kPa}$ ，试求：

(1) 若以上百分数为体积百分率，该混和气体的密度为多少？

(2) 若以上百分数为质量百分率，该混和气体的密度为多少？

解：(1) 对于气体，体积百分数等于分子百分数，故可取 $1 \text{ kmol}$ 烟道气为基准，其中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{N}_2$ 分别为 $0.13 \text{ kmol}$ 、 $0.11 \text{ kmol}$ 和 $0.76 \text{ kmol}$ (见附图 a)。

烟道气的平均分子量为

$$\begin{aligned} M &= 0.13M_{\text{CO}_2} + 0.11M_{\text{H}_2\text{O}} + 0.76M_{\text{N}_2} \\ &= 0.13 \times 44 + 0.11 \times 18 + 0.76 \times 28 = 29.0 \end{aligned}$$