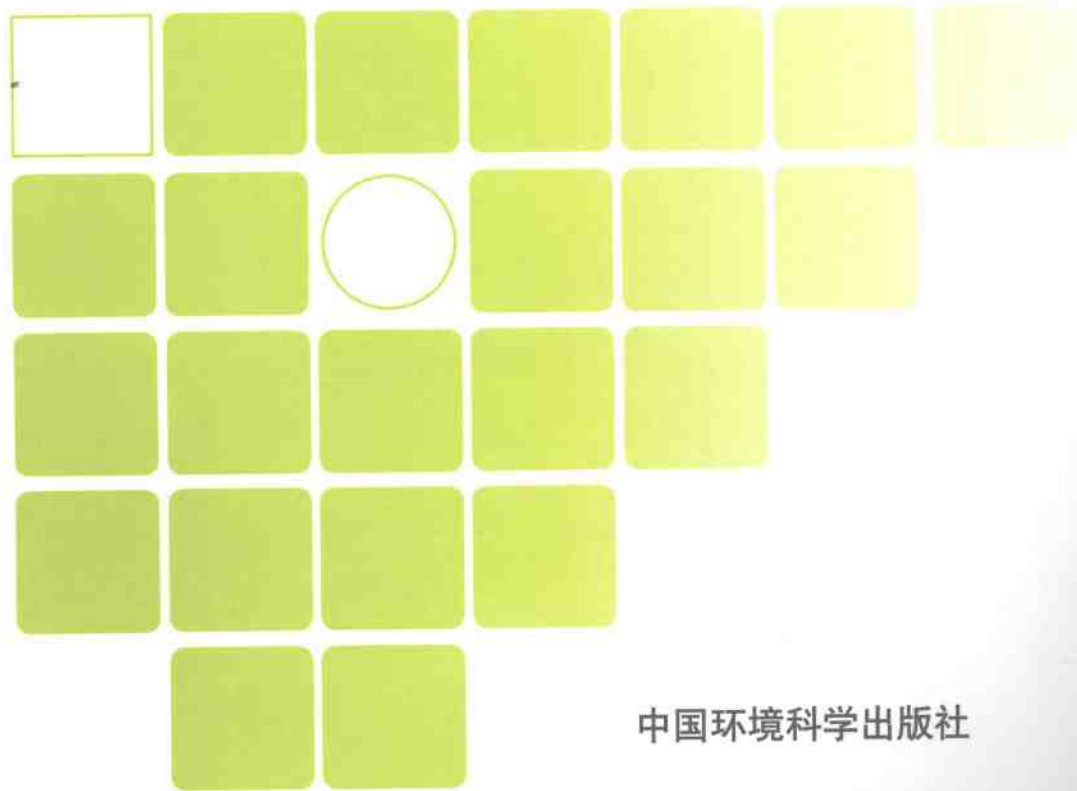


环境工程原理

周长丽 主编

教育部高等学校高职高专环保与
气象类专业教学指导委员会 **推荐教材**



中国环境科学出版社

高等专科学校高等职业技术学院环境类系列教材

环境工程原理

主 编 周长丽

副主编 郭仁惠

主 审 张雪荣

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程原理/周长丽主编. —北京: 中国环境科学出版社, 2007.6

(高职高专环境类系列教材)

ISBN 978-7-80209-550-2

I. 环… II. 周… III. 环境工程学—高等学校: 技术学校—教材 IV.X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 055534 号

责任编辑 黄晓燕 任海燕
责任校对 尹 芳
封面设计 中通世奥

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2007 年 6 月第一版
印 次 2007 年 6 月第一次印刷
印 数 1—3 000
开 本 787×960 1/16
印 张 36.25
字 数 600 千字
定 价 43.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

编 审 人 员

主 编 周长丽
河北工业职业技术学院

副主编 郭仁惠
江苏大学

主 审 张雪荣
河北化工医药职业技术学院

参 编 赵龙涛
河南工程学院

宋万召
扬州环境资源职业技术学院

何红升
邢台职业技术学院

郭东萍
河北工业职业技术学院

丛书编委会

主任 林振山

副主任 李元 王京浩 王国祥

委员 (以姓氏拼音字母排序)

白建国 陈文 谌永红 崔树军 傅刚

高红武 高翔 顾卫兵 关荐伊 郭正

姜成春 蒋云霞 李党生 李树山 廉有轩

刘海春 刘建秋 刘晓冰 卢莎 马英

倪才英 苏少林 孙成 孙即霖 王强

汪葵 相会强 谢炜平 薛巧英 姚运先

张宝军 张弛 赵联朝 周长丽 周清

丛书统筹 黄晓燕

前 言

环境工程单元操作的种类很多,每种单元操作都包含十分丰富的知识内容。根据环境工程的特点和环境工程原理课程的教学要求,本书精选了若干个典型的单元操作进行介绍,力求全面、系统、完整地阐述“三废”污染控制技术所涉及的基本理论、典型设备和工艺方法。全书共分12章,包括流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热、蒸发、蒸馏、吸收、液-液萃取、干燥、吸附、膜分离技术及其他分离技术。

在本教材的编写过程中,遵循了“高职教育教学模式、教学大纲要求及教学方法高度统一;基础理论教学以应用为目的,以必须、够用为度,以掌握概念、强化应用、培养技能为教学重点,突出应用能力和综合素质培养”的原则,体现了以下高职教育特色:

①在结构上,力求章节层次分明,突出职业性、实用性、适用性。改变了原有教材以学科体系为准的编排结构,突出了实际应用能力培养的鲜明特色。

②在内容上,有增有减,一些重要的单元操作中适当删减了公式的理论推导等内容,降低难度;增加了必要的基础理论知识,强化了知识的运用,并突出重点,体现了以能力培养为中心,理论知识以够用为度的原则。

③在内容编排和叙述思路上,力求深入浅出,浅显易懂,避免了一些公式的复杂推导,注重单元操作基础知识的学习及应用。选用实例丰富,贴近生产实际,符合初学者的认识规律,有利于教师讲解和学生自学。

本教材是高职环境类及其相近专业的一门技术基础课的教材,也可作为其他相关专业,如化工、石油、生物工程、制药、冶金、食品等专

业的教材或参考书，也可供有关部门的科研及生产一线技术人员阅读参考。

本书由河北工业职业技术学院周长丽担任主编，并编写绪论、第一章、第二章、第三章、第五章、第七章；江苏大学郭仁惠编写第四章、第九章、第十章；河南工程学院赵龙涛编写第六章、第八章；邢台职业技术学院何红升编写第十一章；扬州环境资源职业技术学院宋万召编写第十二章；附录由河北工业职业技术学院郭东萍和宋万召共同编写。全书由周长丽统稿，河北化工医药职业技术学院张雪荣主审。

在本教材的编写过程中，河北工业职业技术学院刘建秋教授、朱银惠副教授和张素青副教授提供了许多支持和帮助，在此谨向他们以及所有为本书出版提供过帮助的同志表示诚挚的谢意。

虽然作者在编写和修改过程中已作了很大努力，但限于编写人员的水平、时间及经验，教材中难免有疏漏和不完善之处，敬请专家和读者批评指正，以利于该书的进一步修改和完善。

编者

2007年2月

目 录

绪 论	1
复习思考题	8
习 题	8
第一章 流体流动	9
第一节 概 述	9
第二节 流体静力学	20
第三节 流体动力学	31
第四节 输送管路	40
第五节 流体阻力	49
第六节 简单管路的计算	64
第七节 流量的测量	65
第八节 流体阻力的测定	71
复习思考题	77
习 题	77
第二章 流体输送机械	81
第一节 概 述	81
第二节 离心泵	83
第三节 其他类型的液体输送机械	113
第四节 气体输送机械	122
第五节 离心泵特性曲线的测定	141
复习思考题	146
习 题	146
第三章 非均相物系的分离	149
第一节 概 述	149
第二节 沉降分离	152
第三节 过滤分离	176
第四节 静电分离	188
第五节 湿洗分离	190

复习思考题	192
习 题	192
第四章 传 热	193
第一节 概 述	193
第二节 热传导	197
第三节 对流传热	204
第四节 传热过程计算	211
第五节 辐射传热	221
第六节 换热器	223
第七节 总传热系数的测定	232
复习思考题	235
习 题	235
第五章 蒸 发	238
第一节 概 述	238
第二节 单效蒸发过程	240
第三节 多效蒸发过程	246
第四节 蒸发过程的节能措施	249
第五节 蒸发设备	251
第六节 蒸发过程安全运行操作	257
复习思考题	259
习 题	259
第六章 蒸 馏	261
第一节 概 述	261
第二节 双组分溶液的气-液相平衡	262
第三节 精馏原理与流程	272
第四节 双组分连续精馏塔的计算	276
第五节 板式塔	298
第六节 精馏操作与塔板效率的测定	309
复习思考题	313
习 题	313
第七章 吸 收	317
第一节 概 述	317
第二节 吸收过程的气-液相平衡	321
第三节 传质机理与吸收速率方程	331

第四节	吸收塔的计算	338
第五节	解吸及其他类型的吸收	357
第六节	吸收设备	364
第七节	填料吸收塔的操作和吸收系数的测定	377
复习思考题		385
习 题		385
第八章	液-液萃取	388
第一节	概 述	388
第二节	液-液萃取基本原理	393
第三节	萃取设备	403
第四节	超临界流体萃取	409
第五节	脉冲萃取实验	411
复习思考题		414
习 题		414
第九章	干 燥	416
第一节	概 述	416
第二节	湿空气的性质及湿度图	420
第三节	湿物料的性质	429
第四节	干燥过程的计算	432
第五节	干燥设备	439
第六节	洞道干燥速率曲线的测定	447
复习思考题		450
习 题		450
第十章	吸 附	453
第一节	概 述	453
第二节	吸附平衡与吸附速率	458
第三节	吸附分离工艺简介	465
第四节	吸附过程的强化与展望	471
复习思考题		472
第十一章	膜分离技术	473
第一节	概 述	473
第二节	反渗透	480
第三节	电渗析	485
第四节	超滤与微滤	490

第五节 气体膜分离	500
复习思考题	505
第十二章 其他分离技术	506
第一节 电解分离技术	506
第二节 离子交换技术	509
第三节 气浮分离技术	514
第四节 生物处理技术	519
复习思考题	530
附 录	532
附录一 化工常用法定计量单位及单位换算	532
附录二 某些气体的重要物理性质 (101.3 kPa)	534
附录三 某些有机液体的相对密度 (液体密度与4℃时水的密度之比)	535
附录四 某些液体的重要物理性质	536
附录五 部分无机盐水溶液的沸点 (101.3 kPa)	538
附录六 某些固体材料的重要物理性质	539
附录七 水的重要物理性质	540
附录八 饱和水蒸气表 (按温度排列)	541
附录九 饱和水蒸气表 (按压力排列)	542
附录十 干空气的热物理性质 (101.3 kPa)	544
附录十一 水的黏度 (0~100℃)	545
附录十二 液体黏度共线图	546
附录十三 气体黏度共线图	548
附录十四 气体导热系数共线图 (101.3 kPa)	550
附录十五 液体比热容共线图	552
附录十六 气体比热容共线图 (101.3 kPa)	554
附录十七 液体汽化热共线图	556
附录十八 液体表面张力共线图	557
附录十九 管子规格	560
附录二十 离心泵规格 (摘录)	561
附录二十一 4-72-11型离心式通风机的规格	565
附录二十二 换热器系列标准 (摘录)	566
附录二十三 壁面污垢热阻	568
附录二十四 几种常用填料的特性数据	569
参考文献	570

一、环境与环境工程学

1. 环境概念

环境是人类进行生产和生活的场所，一方面，它是人类生存和发展的终极物质来源；另一方面，它承受着人类活动产生的废弃物和各种作用结果。人类与环境之间是一个有着相互作用、相互影响、相互依存关系的对立统一体。人类的生产和生活活动会对环境产生影响，引起环境质量的变化。反过来，污染了的环境也会对人类的身心健康和经济发展等造成不利的影响。

当代社会的发展使人与环境之间的作用与反作用不断加剧。人类活动对环境的影响空前强化，环境污染和生态环境的破坏已达到危险的程度，环境和环境问题已向人们提出了挑战。

2. 环境工程学

环境工程学就是在人类同环境污染作斗争、保护和改善生存环境的过程中形成的，是环境科学的一个分支。主要研究运用工程技术和有关学科的原理和方法，保护和合理利用自然资源，防治环境污染，以改善环境质量。

从环境工程学发展的现状来看，环境工程学基本内容主要有大气污染防治工程、水污染防治工程、固体废弃物的处理和利用、环境污染综合防治、环境系统工程等几个方面。所以，环境工程学是一个庞大而复杂的技术体系。它不仅研究防治环境污染和公害的措施，而且研究自然资源的保护和合理利用，探讨废物资源化技术、改革生产工艺、发展少害或无害的闭路生产系统，按区域环境进行运筹学管理，以获得较大的环境效果和经济效益，这些都成为环境工程学的重要发展方向。

二、环境工程原理的研究对象和任务

1. 研究对象

环境工程原理是环境类及其相近专业的一门主干课程，它是综合运用数学、物理、化学、计算技术等基础知识，分析和解决环境工程领域内环境治理过程中各种物理操作问题的技术基础课，是以环境工程学中涉及的一些基本概念和一些常见的单元操作作为研究对象，系统地研究这些单元操作的基本原理、典型设备的结构、典型工艺以及在环境工程实践中的应用，为后续专业课程的学习打下坚实的基础。

2. 主要任务

本课程强调工程观点、定量运算、实验技能及设计能力的培养, 强调理论联系实际。通过对本课程的学习培养学生以下几个方面的能力。

(1) 单元操作和设备选择的能力。根据生产工艺要求和物系特性, 合理地选择单元操作及设备。

(2) 操作和调节生产过程的能力。学习如何操作和调节生产过程, 在操作发生异常或故障时, 能够查找原因, 提出解决的措施。

(3) 选择适宜操作条件, 探索强化过程的途径和提高设备效能的初步能力。

(4) 查阅各种资料, 正确使用常用工程计算图表的能力。

环境工程原理是一门理论与实践联系非常密切的学科, 在环境类专业创新人才培养中, 它承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。

三、单元操作及其分类

1. 单元操作

在环境治理过程或某种产品的生产过程中, 往往需要几个或几十个加工过程, 其中除了化学反应过程外, 还有大量的物理加工过程。环境治理体系庞大, 化学工业产品种类繁多, 在生产过程中采用了各种各样的物理加工过程。它们的操作原理可以归纳为应用较广的多个基本操作过程, 如流体输送、搅拌、沉降、过滤、热交换、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、萃取、吸附以及干燥等。例如, 乙醇、乙烯及石油等生产过程中常采用蒸馏操作过程分离液体混合物; 废水治理过程中常采用沉降、过滤、吸附、膜分离等过程; 合成氨、硝酸及硫酸等生产过程中常采用吸收操作过程分离气体混合物; 尿素、聚氯乙烯及染料等生产过程中常采用干燥操作过程以除去固体中的水分等, 这些基本的操作过程称为单元操作。

2. 单元操作分类

对于单元操作, 可从不同角度加以分类, 各种单元操作依据不同的物理化学原理, 采用相应的设备, 以达到各自的工艺目的。根据各单元操作所遵循的基本规律, 将其划分为如下几个基本过程。

(1) 动量传递过程

流体流动时, 其内部发生动量传递, 故流体流动过程也称为动量传递过程。遵循动量传递的基本规律以及主要受这些基本规律支配的一些单元操作包括流体输送、沉降、过滤、物料混合(搅拌)及流态化等。

(2) 热量传递过程

热量传递过程简称传热过程。遵循热量传递的基本规律及主要受这些基本规律支配的一些单元操作包括传热、蒸发、结晶等。

(3) 质量传递过程

质量传递过程简称传质过程。遵循质量传递基本规律的单元操作包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、离子交换、膜分离等。从工程目的来看，这些操作都可将混合物进行分离，故又称之为分离操作。

(4) 热、质传递过程

同时遵循热、质传递的基本规律包括干燥、结晶、增湿、减湿等，因为这些单元操作中，不仅有质量传递而且有热量传递。

因此，流体力学、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。每个单元操作的研究内容包括“过程”和“设备”两个方面。一方面，同一单元操作在不同的生产中虽然遵循相同的过程规律，但在操作条件及设备类型（或结构）方面会有很大差别。另一方面，对于同样的工程目的，可采用不同的单元操作来实现。例如一种液态均相混合物，既可用蒸馏方法分离，也可用萃取方法分离，还可用结晶或膜分离方法分离，究竟哪种单元操作最适宜，需要根据工艺特点、物系特性，经过综合技术经济分析后作出选择。

四、单元操作中常用的基本概念

在研究单元操作时，经常用到一些基本概念，如物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、传递速率等。这些基本概念贯穿于本课程的始终，在这里仅作简要说明，详细内容将在以后章节中讲解。

1. 物料衡算

工业生产一般都不可能将投入的原料全部转化成产品，总是或多或少地向环境排放一部分废弃物。这些废弃物则在不同的环境条件下，以不同的种类、形态、数量、浓度、排放方式、去向、时间和速率进入环境。但从环境影响的角度来看，有时成为污染物，有时又不是污染物。它们在昨天被认为是废物，今天或者明天可能会成为宝物。在一定条件下它们是“害”，另一条件下却变成了“利”；在一定条件下排放“废物”是难免的，而在另一条件下把“废物”消除于生产过程中也是可以做到的，关键在于条件。物料衡算就是基于为创造这种条件而进行的基础性工作。

物料衡算是依据质量守恒定律，进入与离开某一操作过程的物料质量之差，等于该过程中累积的物料质量，即：

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{累积量} \quad (0-1)$$

对于连续操作的过程，若各物理量不随时间改变，即处于稳定操作状态时，过程中不应有物料的积累。则物料衡算关系为：

输入量=输出量

(0-2)

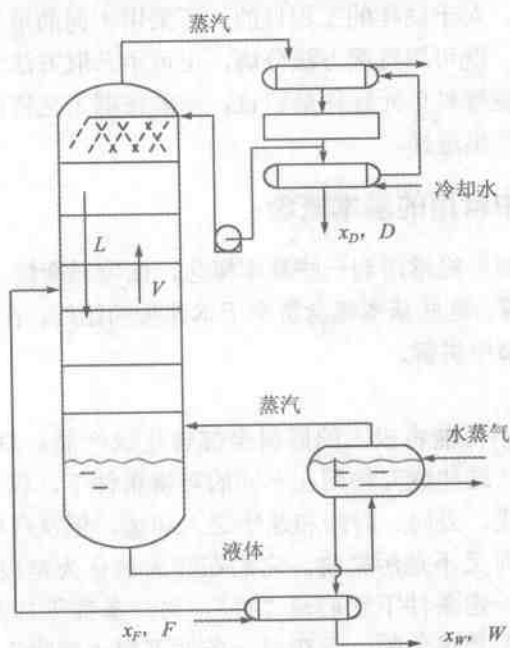
用物料衡算式可由过程的已知量求出未知量。物料衡算一般按下列步骤进行：

(1) 首先根据题意画出各物流的流程示意图，并标上已知数据与待求量；

(2) 在写衡算式之前，要选定计算基准，一般选用单位进料量或排料量、时间及设备的单位体积等作为计算的基准；

(3) 在较复杂的流程示意图上应注明衡算的范围，列出衡算式，求解未知量。

【例 0-1】苯和甲苯混合液中含苯的摩尔分数为 x_F ，以 F kmol/h 的流量连续加入某一精馏塔。塔顶流出液中含苯的摩尔分数为 x_D ，残液中含苯的摩尔分数为 x_W 。试求塔顶苯的流出量 D kmol/h 和塔底甲苯的流出量 W kmol/h。



例 0-1 附图

解：对全塔作物料衡算，即：

$$F = D + W$$

对全塔易挥发组分苯作物料衡算，即：

$$Fx_F = Dx_D + Wx_W$$

解方程组得：

$$W = \frac{F(x_D - x_F)}{x_D - x_W}$$

$$D = \frac{F(x_F - x_W)}{x_D - x_W}$$

2. 能量衡算

本课程所涉及的能量主要有机械能和热能。能量衡算的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在第一章流体流动中讲解，热量衡算在传热、蒸馏、干燥等章中结合具体单元操作详细说明。热量衡算的步骤与物料衡算基本相同。

3. 物系的平衡关系

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。在一定的条件下，过程的变化达到了极限，即过程处于平衡状态。例如，热量从高温物体传到低温物体直至两物体的温度相等为止。在一定温度下，不饱和的食盐溶液与固体食盐接触时，食盐向溶液中溶解，直到溶液为食盐所饱和，食盐就停止溶解，此时固体食盐表面已与溶液成动态平衡，反之，若溶液中食盐浓度大于饱和浓度，则溶液中的食盐会析出，使溶液中的固体食盐结晶长大，最终达到平衡状态。一定温度下，食盐的饱和浓度就是这个物系的平衡浓度。当溶液中食盐的浓度低于饱和浓度，则固体食盐将向溶液中溶解。当溶液中食盐的浓度大于饱和浓度，则溶液中溶解的食盐会析出，最终都会达到平衡状态。从这些例子可以看出，平衡关系可以用来判断过程能否进行，以及进行的方向和限度。

4. 传递速率

传递速率是单位时间内传递过程的变化率。平衡关系只表明过程变化的极限，而传递速率表明过程进行的快慢。在生产中，过程速率比平衡关系更为重要。如果一个过程可以进行，但速率十分缓慢，则该过程无生产应用价值。

在某些过程中，传递速率与过程推动力成正比，与过程阻力成反比，这三者的相互关系类似于电学中的欧姆定律，即

$$\text{传递速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}} \quad (0-3)$$

过程的传递速率是决定设备结构、尺寸的重要因素，传递速率大时，设备尺寸可以小些。由于过程不同，推动力与阻力的内容各不相同。通常，过程离平衡状态越远，则推动力越大，达到平衡时，推动力为零。例如，引起热物体与冷物体间热量流动的推动力是两物体间的温度差，温度差越大，则传热速率越大，温度差等于零时，两物体处于热平衡状态，彼此间不会有热的流动。过程阻力较为复杂，将在有关章节中分别介绍。

由上述可知，改变过程推动力或过程阻力即可改变过程速率。在学习各单元操

作时, 要注意分析影响推动力和阻力的各种因素, 探索提高生产效率的措施。

五、单位制及单位换算

1. 基本单位和导出单位

凡参与生产过程的物料都具有各种各样的物理性质, 如黏度、密度、热导率等, 而且还常用不同的参变量如温度、压强、流速等来表示过程的特征。根据使用方便的原则规定出它们的单位, 这些选择的物理量称为基本物理量, 其单位称为基本单位。其他的物理量, 如速度、加速度、密度等单位则根据其本身的物理意义, 由有关基本单位组合而成, 这种组合单位称为导出单位。

2. 单位制

由于计算各个物理量时, 采用了不同的基本量, 因而产生了不同的单位制。目前最常用的单位制有以下几种。

(1) 绝对单位制和工程单位制。根据对基本物理量及其单位选择的不同, 分为绝对单位制与工程单位制。绝对单位制以长度、质量、时间为基本物理量, 工程单位制以长度、时间和力为基本物理量。显然, 在绝对单位制度中, 力是导出物理量, 其单位为导出单位; 而在工程单位制度中, 质量是导出物理量, 其单位为导出单位。

上述两种单位制又有米制单位与英制单位之分, 见表 0-1。

表 0-1 两种单位制中的米制与英制基本单位

单位制	基本物理量	长度	时间	质量	力或重力
	绝对单位制	CGS 制	cm	s	g
米制		m	s	kg	—
英制		ft	s	lb	—
工程单位制	米制	m	s	—	kgf
	英制	ft	s	—	lb (f)

(2) 国际单位制 (SI 制)。国际单位制是 1960 年 10 月第十一届国际计量大会通过的一种新的单位制, 称为国际单位制, 其代号为 SI。SI 制是一种完整的单位制, 它包括了所有领域中的计量单位。

中国目前使用的就是以 SI 制为基础的法定计量单位, 它是根据中国国情, 在 SI 制单位的基础上, 适当增加了一些其他单位构成的。例如, 体积的单位升 (L), 质量的单位吨 (t), 时间的单位分 (min)、时 (h)、日 (d)、年 (a) 仍可使用。

本书采用法定计量单位, 但在实际应用中, 仍可能遇到非法定计量单位, 需要进行单位换算。不同单位制之间的主要区别在于其基本单位不完全相同。表 0-2 给