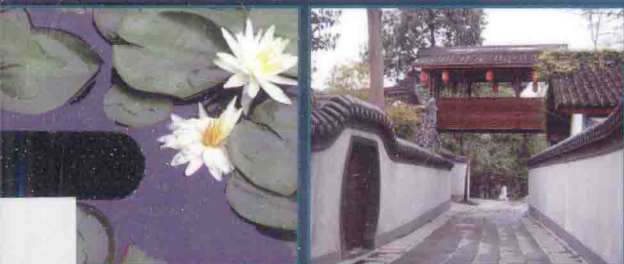


普通高等教育“十二五”规划教材

环境工程原理

贺文智 李光明 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

环境工程原理

贺文智 李光明 主编



化学工业出版社

·北京·

本书针对污染防治与控制以及废弃物资源化等过程所涉及的流体流动、热量传递、质量传递和化学反应等共性技术，重点阐述了相关的基本原理、基本规律以及受这些原理和规律所支配的典型单元操作及典型设备的工艺计算。

本书适合 34~44 学时教学需求的环境科学、环境工程及市政工程等相关专业的本科生作教材使用，也可供环境类及相关专业科技人员参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程原理/贺文智, 李光明主编. —北京: 化学工业出版社, 2014.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-19981-2



I. ①环… II. ①贺…②李… III. ①环境工程-高等学校-教材 IV. ①X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 042357 号

责任编辑: 满悦芝
责任校对: 王素芹

文字编辑: 郑直
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 390 千字 2014 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

本书编写人员名单

主 编：贺文智 李光明

编写人员：贺文智 李光明 李少林 朱昊辰

前 言

环境科学与工程作为研究人类社会发展活动与环境演化规律之间相互作用关系，寻求人类社会与环境协同演化、持续发展途径与方法的新兴学科，包括环境科学、环境工程和环境人文社会科学等主干学科。

环境工程原理是在高等数学、物理学及物理化学等课程的基础上开设的，以环境工程学所涉及的技术原理为主要内容的一门专业基础课。环境工程原理的主要任务是介绍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。高等学校环境科学与工程教学指导委员会将其确定为环境科学与工程本科专业的核心课程之一。同济大学环境本科专业自 2008 年开设该课程以来，积极探索在有限的课程教学时间内，改进教学内容和教学方法，使学生掌握较为系统完整的理论知识，提高学生分析问题和解决问题的能力。该课程自开设以来，取得了良好的教学效果，受到了学生们的普遍欢迎与好评。

编者在探索和从事环境工程原理教学实践的基础上，编写了本书。本书针对污染预防与控制以及废弃物资源化等过程中所涉及的流体流动、热量传递、质量传递以及化学反应等共性技术问题，重点阐述相关的基本原理、基本规律以及典型的单元操作，注重培养与提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书共分 8 章，参加本书编写的主要人员有贺文智（第 1 章～第 4 章），李少林（第 5 章和第 6 章），朱昊辰（第 7 章和第 8 章）。贺文智对全书内容进行了统稿，李光明对全书进行了审核与定稿。

在本书的编写过程中，余露玲、王凡、郭扬和左剑民等对书中的图表、公式和书稿格式等进行了绘制和整理，在此一并表示衷心的感谢。

受编者水平和经验所限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正并提出宝贵意见。

贺文智

2014 年 5 月于同济大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 环境问题与环境科学	1
1.2 环境污染与环境工程学	1
1.3 环境污染控制技术原理	2
1.4 课程内容及课程学习注意事项	2
1.4.1 课程内容	2
1.4.2 课程学习注意事项	3
1.5 物料衡算与能量衡算	3
1.5.1 物料衡算	3
1.5.2 热量衡算	4
1.6 单位制与量纲	5
1.6.1 单位与单位制	5
1.6.2 量纲和无量纲准数	6
习题	7
第2章 流体流动	8
2.1 概述	8
2.1.1 流体流动规律的工程应用	8
2.1.2 连续介质的概念	8
2.1.3 可压缩性流体与不可压缩性流体	8
2.1.4 稳定流动与不稳定流动	9
2.2 流体静力学	10
2.2.1 流体的静压强	10
2.2.2 流体静力学基本方程式	11
2.2.3 流体静力学基本方程式的应用	13
2.3 流体在管内的流动	16
2.3.1 流量与流速	16
2.3.2 连续性方程式	18
2.3.3 伯努利方程式	19
2.3.4 伯努利方程式的应用	23
2.4 流动流体的内部结构	25
2.4.1 牛顿黏性定律与流体的黏度	25
2.4.2 流动类型与雷诺数	28
2.4.3 边界层及边界层脱体	29
2.4.4 圆管内流体运动的速度分布	32

2.5	流体在管内的流动阻力	34
2.5.1	流动阻力的影响因素	34
2.5.2	流体流动的直管阻力	35
2.5.3	流体流动的局部阻力损失	41
2.5.4	管路总能量损失的计算	44
2.6	管路计算与流量测量	45
2.6.1	管路计算	45
2.6.2	流量测量	50
	习题	57
第3章 非均相物系的分离		62
3.1	概述	62
3.1.1	非均相物系分离方法	62
3.1.2	非均相物系分离在工业生产中的应用	62
3.1.3	流体中移动粒子受到的阻力	63
3.2	重力沉降	65
3.2.1	重力沉降速度	65
3.2.2	降尘室	67
3.2.3	沉淀池	70
3.3	离心沉降	70
3.3.1	离心沉降速度	70
3.3.2	旋风分离器	72
3.3.3	旋液分离器	75
3.4	过滤	75
3.4.1	过滤操作的基本概念	75
3.4.2	过滤基本方程式	77
3.4.3	恒压过滤	83
	习题	85
第4章 传热		87
4.1	概述	87
4.1.1	传热基本方式	87
4.1.2	冷热流体接触换热方式及传热设备	88
4.1.3	传热速率及热通量	91
4.2	热传导	91
4.2.1	基本概念及傅里叶定律	91
4.2.2	导热系数	93
4.2.3	平壁定态热传导	94
4.2.4	圆筒壁的热传导	98
4.3	对流传热	101
4.3.1	对流传热分析	101

4.3.2	牛顿冷却定律及对流传热系数	102
4.3.3	流体无相变时的对流传热系数	105
4.3.4	流体有相变时的对流传热系数	111
4.4	传热过程计算	117
4.4.1	总传热速率方程	117
4.4.2	总传热系数	118
4.4.3	平均温度差	122
4.4.4	壁温估算	128
4.5	换热器	129
4.5.1	管式换热器	129
4.5.2	板式换热器	132
4.5.3	热管换热器	133
4.5.4	传热的强化途径	133
	习题	134
第5章	传质基础	137
5.1	传质概述	137
5.1.1	平衡分离过程	137
5.1.2	速率分离过程	138
5.2	环境工程中的传质过程	138
5.3	传质过程机理	139
5.3.1	分子扩散	139
5.3.2	费克定律	139
5.3.3	扩散系数	140
5.3.4	扩散通量及浓度分布	141
5.4	对流传质	147
5.4.1	对流传质机理	147
5.4.2	对流传质边界层	148
5.4.3	对流传质速率方程	149
5.5	两相间的传质	151
5.6	气液传质设备	152
5.6.1	板式塔	152
5.6.2	填料塔	154
	习题	155
第6章	气体吸收	157
6.1	概述	157
6.1.1	气体吸收及其应用	157
6.1.2	气体吸收的分类	157
6.1.3	吸收剂的选择	158
6.2	吸收过程的气液相平衡	159

6.2.1	气体在液体中的溶解度	159
6.2.2	亨利定律	160
6.2.3	相平衡关系在吸收过程中的应用	162
6.3	吸收速率方程	163
6.3.1	相际传质速率	164
6.3.2	膜吸收速率方程及总吸收速率方程	166
6.3.3	总传质系数与膜传质系数	167
6.4	吸收塔的计算	170
6.4.1	吸收塔物料衡算与操作线方程	170
6.4.2	吸收剂用量的确定	172
6.4.3	吸收塔塔径计算	175
6.4.4	吸收塔填料层高度的计算	175
	习题	182
第7章 萃取		184
7.1	概述	184
7.1.1	萃取分离原理	184
7.1.2	萃取操作的经济性	184
7.2	萃取过程的相平衡	185
7.2.1	三元体系的三角形相图	185
7.2.2	溶解度曲线和平衡联结线	185
7.2.3	物料衡算与杠杆定律	187
7.2.4	分配曲线与分配系数	187
7.3	萃取剂的选择	188
7.3.1	萃取剂的选择性系数	188
7.3.2	萃取剂的选择原则	189
7.4	萃取过程计算	189
7.4.1	单级萃取	189
7.4.2	多级错流萃取	192
7.4.3	多级逆流萃取	193
7.4.4	连续逆流萃取	196
7.5	萃取设备化工原理	197
7.5.1	萃取设备的分类	197
7.5.2	混合-澄清槽	198
7.5.3	塔式萃取设备	199
7.5.4	离心萃取器	203
7.5.5	萃取设备的选择	204
	习题	205
第8章 反应工程基础		207
8.1	概述	207

第1章 绪论

1.1 环境问题与环境科学

环境是指与体系有关的周围客观事物（客体或外围事物）的总和，体系为研究的对象，即中心事物（或主体）。环境是一个相对的概念，其以中心事物作为参照系，随中心事物的变化而变化。环境科学中的环境是以人类社会为主体的外部世界，主要是指人类已经认识到的直接和间接影响人类生存、社会发展的周围事物，包括自然环境和人工环境。

环境问题则是指因自然变化或人类活动而引起的环境破坏和环境质量变化，以及由此给人类的生存和发展所带来的不利影响。其中，因自然环境本身变化所引起的环境问题称为原生环境问题或第一类环境问题，如火山爆发、地震、台风、海啸、洪水、旱灾等发生时所造成的环境问题，是地学学科和灾害学的主要研究内容；由于人为因素所造成的环境问题，称为次生环境问题或第二类环境问题，是环境科学研究的范畴。

环境科学所研究的环境问题是伴随着人类的出现、生产力的发展和文明程度的提高而产生的，并由小范围、低危害向大范围、高危害方向发展。尤其是当人类社会进入工业化时期以来，科学技术迅猛发展，机器劳动逐步取代人工劳动，生产力水平迅速提高，人类对自然环境的开发能力达到了空前的程度，由此所引发的环境问题日益凸显。这一时期人类对自然资源进行了掠夺式的开发利用，大规模的垦殖、采矿以及森林采伐使得局部地区的自然环境受到严重破坏；同时，人类将环境作为天然垃圾场，毫无顾忌地向自然界排放废弃物，造成了严重的城市和工业区的环境污染，导致“公害”病和重大公害事件频频出现。当今世界的环境问题呈现出了环境污染范围扩大、难以防范、危害严重等特点，自然环境和自然资源难以承受高速工业化、人口剧增和城市化的巨大压力，世界自然灾害显著增加。

环境科学就是为解决人类所面临的严重的环境问题，为创造更适宜、更美好的环境而逐渐发展形成的，用以研究人类社会活动与环境演化规律之间相互作用的关系，寻求人类社会与环境协同演化、持续发展途径与方法的科学。

虽然古代就已经产生了朴素的环境科学思想，但是作为一门独立的学科，环境科学是20世纪60年代才诞生的，并在70年代得到了迅速发展，90年代学科体系趋于成熟。进入21世纪，学科在广度和深度上均得到了更全面的拓展。

环境科学是一个由多学科到跨学科的庞大科学体系组成的新兴学科，也是一个介于自然科学、社会科学和技术科学之间的边际学科。其主要是运用自然科学和社会科学的有关理论、技术和方法来研究环境问题，在与有关学科相互渗透、交叉中形成了许多分支学科。环境工程学是环境科学的一个重要分支。

1.2 环境污染与环境工程学

环境污染是指人类直接或间接地向环境排放超过其自净能力的物质或能量，从而使环境的质量降低，对人类的生存与发展、生态系统和财产等造成不利影响的现象，是人类面临的

主要环境问题之一。具体包括：水污染、大气污染、噪声污染、放射性污染等。

环境工程学作为环境学科的一个重要分支，是在人类同环境污染做斗争、保护和改善生存环境的过程中形成的，其主要任务是运用工程技术和有关学科的原理和方法，研究环境污染控制理论、技术、措施和政策，以改善环境质量，保证人类的身体健康和生存以及社会的可持续发展。环境工程学作为一个庞大而复杂的技术体系（图 1-1），研究对象不仅包括水质净化与水污染控制技术、大气（包括室内空气）污染控制技术、固体废物处理处置与管理及其资源化技术、物理性污染（热污染、辐射污染、噪声、振动等）控制技术、自然资源的合理利用与保护、环境监测与环境质量评价等传统内容，还包括生态修复与构建理论与技术、清洁生产理论与技术以及环境规划管理与环境系统工程等。

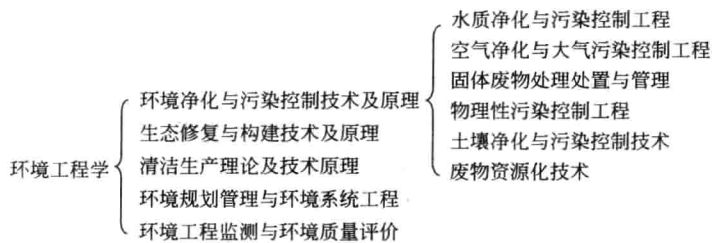


图 1-1 环境工程学的学科体系

1.3 环境污染控制技术原理

为了解决日益严重的环境污染问题，科技工作者经过长期的探索和实践，研究开发出了种类繁多的环境污染控制技术。基于技术原理，这些种类繁多的环境污染控制技术可以分为“隔离技术”、“分离技术”和“转化技术”三大类。

隔离技术是将污染物与污染介质隔离，从而切断污染物向周围环境扩散的途径，防止污染进一步扩大；分离技术是利用污染物与污染介质或其他污染物在物理性质或化学性质上的差异使其与介质分离，从而达到污染物去除或回收利用的目的；转化技术是通过化学反应或生物反应，使污染物转化成无害物质或易于分离的物质，从而使污染介质得到净化与处理。

对于具体的环境污染控制工程实践，因所处理的对象不同，相应的技术工艺过程复杂多变，但其所涉及的流体输送、沉降、过滤、换热（加热和冷却）、蒸发、吸收、萃取、干燥等物理过程以及不同的反应过程均具有相同的基本原理和通用的典型设备。其中流体输送、沉降、过滤、换热（加热和冷却）、蒸发、吸收、萃取、干燥等基本物理过程，称之为单元操作。环境污染控制工程所涉及的这些共性问题正是本课程所要讨论的内容。

1.4 课程内容及课程学习注意事项

1.4.1 课程内容

本书面向高等学校环境类专业对短学时环境工程原理课程内容的需求，聚焦环境净化与污染控制过程所涉及的流体流动、热量传递、质量传递及反应工程等技术共性，重点阐述相关的基本原理、基本规律以及受这些规律所支配的重点单元操作，注重学生分析问题和解决问题能力的培养。课程主要内容包括以下几项。

(1) 流体流动 研究流体流动以及流体和与之接触的固体间发生相对运动时的基本规律, 以及主要受这些基本规律支配的沉降和过滤单元操作。

(2) 热量传递 研究传热的基本规律, 以及主要受这些基本规律支配的热交换单元操作。

(3) 质量传递 研究物质通过相界面迁移的基本规律, 以及主要受这些基本规律支配的气体吸收和液-液萃取单元操作。

(4) 反应工程 主要阐述化学与生物反应计量学及动力学、化学和生物反应器的类型及其操作等。

1.4.2 课程学习注意事项

(1) 物料衡算及能量衡算是本课程常用的手段 在研究各种单元操作时, 为了搞清楚过程始末和过程之中有关物料的数量、组成之间的关系以及过程所吸收或释放的能量, 必须进行物料衡算及能量衡算。

(2) 平衡关系和速率关系是研究各种单元操作过程原理的基本内容 为了计算单元操作所需设备的工艺尺寸, 必须借助平衡关系了解过程进行的方向与极限, 依赖速率关系分析过程进行的快慢程度。

(3) 单元操作进行的方式

① 间歇过程与不稳定操作。间歇过程即分批进行的过程, 每次操作之初向设备投入一批原料, 经过处理之后, 排出全部产物, 再重新投料。小规模工艺过程多采用间歇操作。间歇操作的设备里, 同一位置在不同时刻进行着不同的操作步骤, 因此, 同一位置物料的组成、温度、压强、流速等参数均随时间而改变, 属于不稳定操作。

② 连续过程与稳定操作。连续过程是指不断地从设备一端送入原料, 从另一端排出产品。在连续操作的设备里, 各个位置物料的组成、温度、压强、流速等参数可互不相同, 但在任一固定位置上, 这些参数一般不随时间而变, 属于稳定操作。大多数工艺过程是连续的, 正常情况下的操作状态都是稳定的, 但在开车、停车、发生波动与故障以及调节过程中属于暂时的不稳定操作。

1.5 物料衡算与能量衡算

1.5.1 物料衡算

根据质量守恒定律, 向衡算系统输入的物质质量减去从衡算系统输出的物质质量必等于积累在衡算系统内的物质质量, 即:

$$\sum m_i - \sum m_o = m_A \quad (1-1)$$

式中 $\sum m_i$ ——输入物料量的总和;

$\sum m_o$ ——输出物料量的总和;

m_A ——积累的物料量。

物料衡算通式(1-1)适用于任何指定的空间范围及生产过程所涉及的全部物料。当没有化学变化时, 此通式适用于衡算系统中混合物的任一组分; 当有化学变化时, 此通式适用于衡算系统中的各个元素。

进行物料衡算时, 首先应绘出流程简图并圈出衡算的范围, 然后确定衡算对象及衡算基准, 最后把穿越系统边界的物料流股逐项列出进行计算。对于间歇过程, 常以一次(一批)

操作为基准，即式(1-1)中各项分别代表每次操作输入、输出及积累物料的质量；对于连续过程，常以单位时间为基准，而单位时间流过的物料质量称之为质量流量，用符号 q_m 表示。所以，连续过程的物料衡算式可表示为：

$$\sum q_{mi} - \sum q_{mo} = \frac{dm_A}{d\theta} \quad (1-2)$$

式中 q_{mi} 、 q_{mo} ——分别为每股输入、输出物料的质量流量，kg/s；

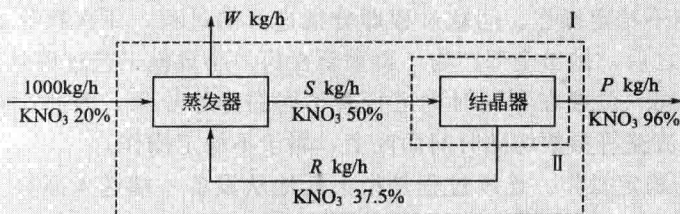
$\frac{dm_A}{d\theta}$ ——物料的质量累积速率，kg/s。

因连续稳定操作时设备内不会有物料积累，即 $\frac{dm_A}{d\theta} = 0$ ，所以

$$\sum q_{mi} = \sum q_{mo} \quad (1-3)$$

【例 1-1】 已知含 20% KNO_3 的原料液以 1000kg/h 的流量进入蒸发器，蒸出水分 W kg/h；浓缩液为 S kg/h，含 KNO_3 50%，进入结晶器，得到含 96% KNO_3 的结晶产品 P kg/h；循环母液 R kg/h，含 37.5% KNO_3 ，回到蒸发器再循环，求 W 、 S 、 P 、 R 各为多少？

解：(1) 绘简图 根据题意绘制流程简图



(2) 划范围 选取蒸发器和结晶器为衡算范围 I，结晶器为衡算范围 II。

(3) 定基准 连续操作，以单位时间 (h) 为衡算基准。

(4) 列算式 由衡算范围 I，总物料：

$$1000 = W + P$$

KNO_3 组分：

$$1000 \times 0.2 = W \times 0 + P \times 0.96$$

由衡算范围 II，总物料：

$$S = P + R$$

KNO_3 组分：

$$S \times 0.5 = P \times 0.96 + R \times 0.375$$

总计 4 个方程，可联立求得 4 个未知数，分别为： $W = 791.7 \text{ kg/h}$ ， $P = 208.3 \text{ kg/h}$ ， $S = 974.8 \text{ kg/h}$ ， $R = 766.5 \text{ kg/h}$ 。

1.5.2 热量衡算

能量的形式是多样的，热量是其中的一种形式，各种形式的能量与热量之间是可以相互转换的。但在众多的工业生产过程中，常见的能量形式是热能，而且常常没有或不需要考虑其他形式的能量与热能之间的转换，这样能量衡算就成为了热量衡算。

进行热量衡算的基本方法与物料衡算相同，计算依据是能量守恒定律，即任何时间内通过各种途径进入系统的总热量必等于同一时间内排出系统的总热量。进行热量衡算时，应注

意以下两点。

① 进、出系统的物料所带的热量由显热及潜热两部分组成，总称为物料的焓 (H , kJ/kg)。物料的焓为一相对值，与物料所处状态有关。所以进行热量衡算时，必须规定基准温度和基准状态。通常以 273K、液态为基准，并规定 273K 时液态的焓为零。

② 热量除了伴随物料进出系统外，还可通过设备外壳、管壁由系统向外界散失或由外界传入系统。只要系统与外界存在温度差，就有热量的散失，称之为热损失 Q_L 。

因此，连续稳定过程的热量衡算基本关系式可表达为：

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_L \quad (1-4a)$$

或
$$\sum (q_m H)_i = \sum (q_m H)_o + Q_L \quad (1-4b)$$

式中 $\sum Q_i$, $\sum (q_m H)_i$ ——伴随各股输入物料进入系统的总热 (焓) 流量, kJ 或 kW;

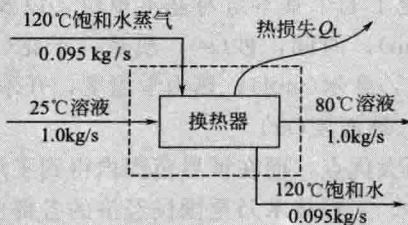
$\sum Q_o$, $\sum (q_m H)_o$ ——伴随各股输出物料离开系统的总热 (焓) 流量, kJ 或 kW;

Q_L ——系统向环境散失的热量 (或称为热损失), kJ 或 kW。

【例 1-2】 在换热器中将平均比热容为 $3.56\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 的某种溶液自 25°C 加热到 80°C , 溶液流量为 1.0kg/s 。加热介质为 120°C 的饱和水蒸气, 其消耗量为 0.095kg/s , 蒸汽冷凝成同温度的饱和水后排出。试计算换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。

解：

(1) 绘简图 根据题意绘图。



(2) 划范围 以换热器为衡算范围。

(3) 定基准 单位时间 (1s), 0°C 、液体。

(4) 列算式 查水蒸气数据: 120°C 饱和水蒸气的 $H_i = 2708.9\text{kJ/kg}$; 120°C 饱和水的 $H_o = 503.67\text{kJ/kg}$ 。

则由式(1-4a):

$$1.0 \times 3.56 \times (25 - 0) + 0.095 \times 2708.9 = 1.0 \times 3.56 \times (80 - 0) + 0.095 \times 503.67 + Q_L$$

$$Q_L = 13.70 (\text{kW})$$

水蒸气提供热量:

$$Q = 0.095 \times (2708.9 - 503.67) = 209.5 (\text{kW})$$

$$\text{热损失百分数} = 13.70 / 209.5 = 6.54 (\%)$$

1.6 单位制与量纲

1.6.1 单位与单位制

任何物理量的大小都是用数字与单位的乘积表示的, 物理量的单位可以任意选择。由于各种物理量间存在着客观的联系, 因此无需对每种物理量的单位都单独进行任意的选择, 而

是通过某些物理量的单位来量度另一些物理量。

通常先选定几个独立的物理量（如长度、时间等），称为基本量，并根据使用方便的原则制定出这些量的单位，称为基本单位。然后，其他物理量（如速度、加速度等）的单位便可根据它们与基本量之间的关系来确定，这些物理量称为导出量，其单位称为导出单位。基本单位与导出单位的总和称为单位制。

因基本量及其单位的选择不同，会产生不同的单位制。历史上，常见的几种单位制所用的基本量与基本单位见表 1-1 所示。

表 1-1 绝对单位制与重力单位制

基本单位 单位制	长度	时间	质量	力
绝对单位制				
CGS(物理单位制)	cm	s	g	
MKS 制	m	s	kg	
重力单位制(工程单位制)	m	s		kgf

由于科学技术领域曾存在着多种单位制并用的局面，因此，同一个物理量在不同的单位制中具有不同的单位与数值，给计算和交流带来了不便，并且容易引起错误。为改变这种局面，1960年10月召开的第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制，称为国际单位制，其国际符号为SI。SI制共规定了七个基本量与基本单位，以及两个辅助量。七个基本量与基本单位分别为：长度，米(m)；时间，秒(s)；质量，千克(kg)；电流，安培(A)；发光强度，坎德拉(cd)；物质的量，摩尔(mol)；热力学温度，开尔文(K)。两个辅助量分别为：平面角，弧度(rad)；立体角，球面度(sr)。

国际单位制因具有如下两大优点，而在世界范围内得到了广泛的推广应用。

(1) 通用性 在自然科学、工程技术乃至国民经济的各部门中，所有物理量的单位都可由上述七个基本单位和两个辅助量导出，也就是说，SI制是所有科学、技术、经济部门都可采用的一套完整的单位制。

(2) 一贯性 任何一个SI导出单位在由上述七个基本单位相乘或相除而导出时，都无需引入比例系数，SI中每种物理量只有一个单位。例如，热和功是本质相同的物理量（能量），但在重力单位制中，热的单位是kcal，功的单位是kgf·m，在运算中必须通过“热功当量”（1kcal=427kgf·m）这样一个比例系数来转换；而在SI中，热、功、能三者的单位均采用J（焦耳），转换时无需比例系数。

1.6.2 量纲和无量纲准数

量纲是物理学中的一个重要概念。它可以定性地表示出物理量与基本量之间的关系，可有效地应用它进行单位换算，也可以用来检查物理公式的正确与否，还可以通过它来推知某些物理规律。我们在后续的课程学习中，经常会遇到量纲这一概念。所谓量纲，是在选定了单位制之后，将一个物理导出量用若干个基本量的乘方之积表示出来的表达式，称之为该物理量的量纲式，简称量纲（旧称因次）。例如，在SI中，如基本物理量长度、质量和时间的量纲符号分别用L、M、T表示，则速度、加速度和力的量纲就分别为：速度 $u=ds/dt$ ，量纲 $L \cdot T^{-1}$ ；加速度 $a=du/dt$ ，量纲 $L \cdot T^{-2}$ ；力 $F=ma$ ，量纲 $M \cdot L \cdot T^{-2}$ 。

根据量纲的概念，物理量依据其属性可分为两类。一类物理量的大小与度量时所选用的单位有关，称之为有量纲量，例如长度、时间、质量、速度等就是常见的有量纲量；另一类

物理量的大小与度量时所选用的单位无关，称之为无量纲量或无量纲准数，例如角度、长度之比、时间之比等。

无量纲准数因无单位，其数值大小与所选单位制无关，只要组合群数的各个量采用同一单位制，都可得到相同数值的无量纲准数。

习 题

- 1-1 某一段河流上游流量为 $36000\text{m}^3/\text{d}$ ，河水中的污染物浓度为 $3.0\text{mg}/\text{L}$ 。现有流量为 $10000\text{m}^3/\text{d}$ 的一条支流汇入该河段，其中污染物浓度为 $30\text{mg}/\text{L}$ 。假设完全混合，试求：
- (1) 下游的污染物浓度；
 - (2) 每天有多少千克的污染物质通过下游某一监测点。
- 1-2 将 A、B、C、D 四种组分各为 0.25（摩尔分数，下同）的某混合溶液，以 $1000\text{kmol}/\text{h}$ 的流量送入精馏塔内进行分离，分别在塔顶与塔釜得到两股产品。进料中的全部 A 组分、96% 的 B 组分及 4% 的 C 组分存于塔顶产品中，全部 D 组分存于塔釜产品中，试计算塔顶与塔釜产品的流量及其组成。
- 1-3 某污水处理工艺中包括沉淀池和浓缩池。沉淀池用于去除水中的悬浮物，上清液排放；浓缩池用于将沉淀的污泥进一步浓缩，上清液返回到沉淀池中。沉淀池进水流量为 $5000\text{m}^3/\text{d}$ ，悬浮物浓度 $200\text{mg}/\text{L}$ ，出水中悬浮物浓度为 $20\text{mg}/\text{L}$ ；沉淀污泥的含水率为 99.8%，进入浓缩池停留一定时间后，排出的污泥含水率为 96%，上清液中悬浮物含量为 $100\text{mg}/\text{L}$ 。假设系统处于稳定状态，过程中没有生物作用，试求整个系统的污泥产量和排水量，以及浓缩池上清液回流量。注：污水密度取值为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，含水率为质量百分数。
- 1-4 每小时将 200kg 的过热氨气（压强为 1200kPa ）从 95°C 冷却、冷凝为饱和液氨。已知冷凝温度为 30°C 。采用冷冻盐水为冷却、冷凝剂，盐水于 2°C 下进入冷却、冷凝器，离开时为 10°C 。求每小时盐水的用量（热损失可以忽略不计）。

物料焓值表

物料	温度/ $^\circ\text{C}$	焓/ (kJ/kg)
过热氨气	95	1647
饱和液氨	30	323
盐水	2	6.8
	10	34

- 1-5 在一列管式换热器中用 373K 的饱和水蒸气将某液体从 298K 加热到 353K ，液体流量为 $1000\text{kg}/\text{h}$ ，平均比热容为 $3.56\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。饱和水蒸气冷凝放热后以 373K 的饱和水排出。换热器向四周的散热速率为 $10000\text{kJ}/\text{h}$ 。试求稳定操作下加热所需的蒸汽量。