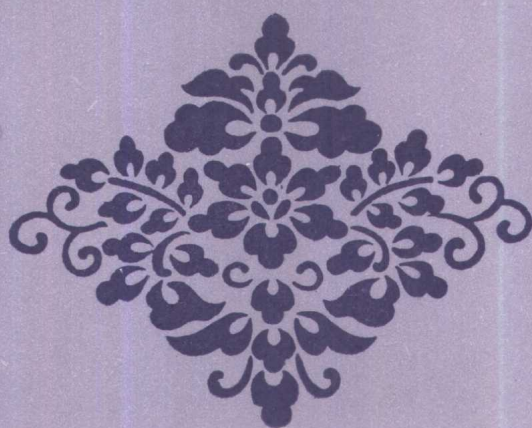


普通高等教育中医药类规划教材

中药制药工程 原理与设备

(供中药类专业用)

主 编 王韵珊
副主编 刘落宪
主 审 施顺清



上海科学技术出版社

普通高等教育中医药类规划教材

中药制药工程原理与设备

(供中药类专业用)

主 编	王韵珊
副主编	刘落宪
编 委	刘 军 刘晓秋
	臧海山
主 审	施顺清

上海科学技术出版社

普通高等教育中医药类规划教材

中药制药工程原理与设备

(供中药类专业用)

主编 王韵珊

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

发行所上海发行所经销 常熟市印刷六厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23 字数 545,000

1997年 2 月第 1 版 1997年 10 月第 2 次印刷

印数 2,001—6,000

ISBN 7-5323-4248-4/R·1120(课)

定价: 17.65元

普通高等教育中医药类规划教材

顾问委员会名单

(按姓氏笔画排列)

王玉川	王绵之	邓铁涛	刘志明	刘弼臣	刘渡舟
江育仁	杨甲三	邱茂良	罗元恺	高天裕	赵绍琴
施莫邦	祝湛予	顾伯康	董建华	程莘农	裘沛然
路志正					

编审委员会名单

主任委员: 张文康

副主任委员: 于生龙 李振吉 陆莲舫

委员: (按姓氏笔画排列)

于生龙	于永杰	万德光	马宝璋	马 驥
王永炎	王世成	王和鸣	王洪图	王萍芬
王新华	王韵珊	王耀庭	韦贵康	邓福树
龙致贤	叶传蕙	叶定江	石学敏	丘和明
丘德文	皮持衡	朱文锋	任继学	刘柏龄
刘振民	孙国杰	孙 校	杜 健	杨兆民
杨春澍	李任先	李安邦	李明富	李振吉
李家实	李 鼎	严世芸	严振国	吴敦序
何 珉	肖崇厚	沈映君	陈 奇	陈大舜
陈子德	陆莲舫	陆德铭	张文康	张六通
张安楨	张志刚	张绚邦	张殿璞	范碧亭
罗永芬	周梦圣	郑守曾	尚炽昌	宗全和
孟 如	项 平	柯雪帆	钟 森	段逸山
段富津	施 杞	施顺清	施雪筠	袁 浩
钱 英	徐生旺	高尔鑫	郭诚杰	梁颂名
葛琳仪	彭胜权	傅世垣	曾诚厚	雷载权
黎伟台	戴锡孟	魏 民	魏 稼	魏璐雪

前 言

根据国家教委《全国普通高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》“要集中力量抓好本科主要专业主干课程教材建设”的精神,国家中医药管理局统一组织编审出版了普通高等教育中医药类规划教材。本套教材包括中医学、中药学专业的的主要课程和针灸、中医骨伤科学专业主要专业课程教材,计有《医古文》、《中医基础理论》、《中医诊断学》、《中药学》、《方剂学》、《中医内科学》、《中医外科学》、《中医妇科学》、《中医儿科学》、《中医急诊学》、《内经选读》、《伤寒论选读》、《金匱要略选读》、《温病学》、《正常人体解剖学》、《生理学》、《病理学》、《生物化学》、《诊断学基础》、《内科学》、《针灸学》、《经络学》、《腧穴学》、《刺法灸法学》、《针灸治疗学》、《中医骨伤科学基础》、《中医骨伤学》、《中医骨病学》、《中医筋伤学》、《中医学基础》、《药用植物学》、《中药化学》、《中药药理学》、《中药鉴定学》、《中药炮制学》、《中药药剂学》、《中药制剂分析》、《中药制药工程原理与设备》等三十八门课程教材及其相关实践教学环节教材。

为了提高教材质量、深化教学领域改革,国家中医药管理局于一九九二年四月在杭州召开了全国中医药本科教材建设工作会议,研究部署了本套教材的建设工作,会后下发了《普通高等教育中医药类规划教材编写基本原则》、《普通高等教育中医药类规划教材组织管理办法》、《普通高等教育中医药类规划教材主编单位招标办法》等文件。通过招标,确定并聘任了各门教材主编。一九九二年十一月在北京召开的普通高等教育中医药类规划教材建设工作会议上,成立了普通高等教育中医药类规划教材编审委员会,讨论研究了本套教材的改革思路,并组成了各门教材编写委员会,确定了审定人。

为了保证教材的编写质量,先后召开了几次工作会议和教材审定会议,对各门课程教学大纲、教材编写提纲及教材内容进行了认真审定。最后,还征求了本套规划教材顾问委员会各位名老中医药专家的意见。通过多次会议以及全体编委审定人的共同努力,在名老中医药专家的指导下,使本套教材在前五版统编教材的基础上,在符合本科专业培养目标的实际需要方面,在理论联系实际、保持中医理论的系统性和完整性,反映中医药学术发展的成熟内容和教育改革新成果方面,在明确各门教材的教学目的、确定教材内容的深广度、促进教材体系整体优化等方面有了较大的提高,使本套规划教材内容能具体体现专业业务培养的基本要求和教学质量测试的基本标准。对少数教材根据课程设置的需要,进行了较大幅度的改革,使之更符合教学的需要。根据国家教委有关文件精神,各高等中医药院校、高等医药院校中医药类专业应优先选用这套由国家中医药管理局统一规划组织编审的规划教材。

随着中医药高等教育工作的不断改革与深化,本套教材不可避免地还存在一些不足之处,殷切希望各地中医药教学人员和广大读者在使用过程中,提出宝贵意见,以促使本套教材更臻完善和更符合现代中医药教学的需要。

普通高等教育中医药类规划教材编审委员会

一九九四年十二月

编写说明

本书是在国家中医药管理局领导下，由普通高等教育中医药类规划教材编审委员会组织编写的。供全国中医药院校和其他有关院校中药制药专业教学用，也可供从事有关专业的科研、设计和生产单位工程技术人员参考。

本书是在中国药科大学讲授《中药制药工程原理与设备》原有教材的基础上，结合编者多年的教学经验，参考国内外有关教材和专著，加以整理、充实和修改而编写成的。书中重点介绍了中药制药过程中典型设备的基本原理、选型及计算方法，并注意理论联系实际，以培养学生分析和解决中药制药工艺过程中的实际问题的能力。全书简明扼要、重点突出。书末附有习题与附录，用以帮助学生更深入了解和掌握。

限于编者的学识和教学水平，书中的缺点和错误在所难免，衷心希望广大师生与同行专家批评指正。

中药制药工程原理与设备编委会

一九九六年二月

目 录

绪论	1
第一章 流体流动	6
第一节 流体静力学基本方程式	6
一、密度	6
二、压力	7
三、流体静力学基本方程式	9
四、流体静力学基本方程式的应用	10
第二节 流体在管内的流动	14
一、流量与流速	14
二、稳定流动与不稳定流动	16
三、连续性方程式——物料衡算	16
四、柏努利方程式——能量衡算	17
五、柏努利方程式的应用	19
第三节 流体在管内的流动阻力	23
一、粘度	23
二、流体流动的类型	24
三、边界层	27
四、流动阻力	27
五、局部阻力损失	32
六、管路总能量损失的计算	35
七、降低流动阻力的途径	37
八、管路计算	37
第四节 流量测量	39
一、测速管	39
二、孔板流量计	41
三、文丘里流量计	43
四、转子流量计	44
本章符号说明	45
第二章 输送机械	47
第一节 液体输送机械	47
一、离心泵	47
二、往复泵、旋转泵、漩涡泵	60
三、各类泵的比较	62
第二节 气体输送机械	63
一、通风机	63
二、鼓风机	66

三、压缩机	67
四、真空泵	68
第三节 固体输送机械	70
一、带式输送机械	70
二、斗式升降输送机械	70
三、螺旋输送机械	71
四、气力输送	71
五、加料器	73
本章符号说明	74
第三章 沉降与过滤	75
第一节 沉降	75
一、重力沉降	75
二、离心沉降	79
第二节 过滤	83
一、过滤操作的基本概念	83
二、过滤过程的计算基础	84
三、过滤基本方程式	85
四、过滤计算	87
五、过滤设备	94
第三节 离心分离	98
一、离心分离的概念	98
二、离心分离设备	99
第四节 其他分离方法	101
一、过滤净制	101
二、湿法净制	101
三、气体的电净制	102
本章符号说明	103
第四章 液体搅拌	105
第一节 机械搅拌装置	106
一、搅拌器的类型	106
二、混合机理	106
第二节 搅拌器	109
一、旋桨式搅拌器	110
二、涡轮式搅拌器	110
三、低转速大叶片搅拌器	111
四、搅拌器的强化措施	111
五、搅拌器的选型	113
第三节 搅拌功率	114
一、搅拌器混合效果与功率消耗	114
二、搅拌功率曲线	116
第四节 搅拌器的放大	117
一、放大的概念	117

二、搅拌器的放大	117
本章符号说明	118
第五章 传热	119
第一节 概述	119
一、传热方式	119
二、热流量和热流密度	120
三、稳定传热和不稳定传热	123
第二节 热传导	121
一、傅里叶定律	121
二、导热系数	124
三、平壁的热传导	123
四、圆筒壁的热传导	126
第三节 对流传热	128
一、基本概念	128
二、对流热流量方程和对流传热系数	129
三、对流传热系数的影响因素	130
四、对流传热过程的量纲分析	131
五、流体无相变时的对流传热系数	133
六、流体有相变时的对流传热系数	134
第四节 传热计算	144
一、热流量的计算	145
二、平均温度差的计算	146
三、总传热系数的计算	150
四、管壁有污垢时K值的计算	152
五、壁温的计算	153
第五节 辐射传热	154
一、基本概念	154
二、物体的辐射能力	155
三、物体间的辐射传热	156
四、气体辐射	157
五、设备热损失的计算	157
第六节 换热器	159
一、间壁式换热器	159
二、新型换热器	163
三、换热器的设计计算	166
四、换热器的选型	170
五、强化传热过程的途径	170
本章符号说明	171
第六章 蒸发	174
第一节 蒸发设备	174
一、蒸发器	174
二、蒸发器的选型	181

三、蒸发器的辅助设备	180
第二节 单效蒸发和真空蒸发	182
一、单效蒸发流程	182
二、单效蒸发的计算	183
三、真空蒸发	188
四、蒸发器的生产强度	188
第三节 多效蒸发与节能措施	189
一、多效蒸发流程	189
二、多效蒸发的计算步骤	191
三、多效蒸发与单效蒸发的比较	192
四、蒸发过程的节能措施	194
本章符号说明	196
第七章 蒸馏	198
第一节 双组分溶液的气液平衡	198
一、拉乌尔定律和相律	198
二、气液相平衡图	199
三、挥发度及相对挥发度	200
第二节 蒸馏方法	202
一、简单蒸馏和平衡蒸馏	202
二、精馏原理	203
三、精馏流程	204
第三节 连续精馏操作线方程	205
一、全塔物料衡算	205
二、操作线方程	207
三、回流比的选择	211
第四节 塔板层数的确定	214
一、理论板层数	214
二、实际板层数	217
第五节 塔高和塔径的计算	218
一、塔高的计算	218
二、塔径的计算	220
第六节 精馏装置的热量衡算与节能	221
一、精馏装置的热量衡算	221
二、精馏装置的节能	222
第七节 蒸馏设备	222
一、板式塔	223
二、填料塔	220
三、板式塔和填料塔的比较	234
第八节 恒沸精馏和萃取精馏	235
一、恒沸精馏	235
二、萃取精馏	235
本章符号说明	237

第八章 干燥	240
第一节 湿空气的性质和湿度图	241
一、湿空气的性质	241
二、湿空气的 $H-h$ 图	247
第二节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	250
一、干燥过程的物料衡算	251
二、干燥过程的热量衡算	253
第三节 干燥速率和干燥时间	256
一、物料中所含水分的性质	256
二、干燥特性曲线	258
三、恒定操作条件下干燥时间的计算	262
第四节 干燥器	264
一、干燥器的基本要求	264
二、干燥器的分类	264
三、干燥器的选型	279
本章符号说明	280
第九章 粉碎筛分与混合	283
第一节 粉碎	283
一、概述	283
二、粉碎机理	283
三、粉碎方法	283
四、粉碎设备	284
第二节 筛分	287
一、概述	287
二、筛的种类及标准	287
三、筛分设备	288
第三节 混合	289
一、概述	289
二、混合机理	290
三、混合设备	290
第十章 固液提取	292
第一节 概述	292
一、提取速率公式	292
二、提取原理	293
三、提取工艺参数	294
第二节 固液提取工艺流程和设备	294
一、固液提取工艺流程	295
二、固液提取设备	297
第十一章 成型设备	302
第一节 丸剂的设备	302
一、丸剂的塑制设备	302
二、丸剂的泛制设备	303

三、丸剂的滴制设备	304
第二节 片剂的设备	305
一、造粒设备	305
二、压片设备	306
三、影响片剂强度的因素	310
第三节 其他制剂设备	310
一、注射剂灌封设备	310
二、口服液灌封设备	311
三、胶囊剂填充和轧囊设备	312
第十二章 工艺设计	315
第一节 平面设计原则	315
一、总体设计	315
二、车间平面布置	316
三、通风、空调与净化	319
第二节 车间设计	321
一、方案设计	321
二、生产工艺流程设计	321
三、物料衡算	321
四、能量衡算	322
五、设备选择	322
六、车间布置	322
七、工艺管路设计	322
八、非工艺设计项目	323
九、编制概算书	323
十、编制工艺设计文件	324
第三节 中成药生产车间的工艺设计	324
一、工艺流程与主要设备	324
二、中成药生产车间布置	326
习题	329
附录	337
一、单位及其换算	337
二、干空气的物理性质($p=101.33\text{kPa}$)	342
三、水的物理性质	343
四、水蒸气的物理性质	345
五、某些液体的重要物理性质	348
六、某些气体的重要物理性质	349
七、常用固体材料的重要物理性质	350
八、管子规格	351
九、B型水泵性能表(摘录)	354
十、标准筛目	356

绪 论

《中药制药工程原理与设备》是运用化学工程学的原理与方法,研究和探讨中药制药过程中的原料、半成品和成品的加工过程和方法的一门学科。它既可视作化学工程中的一个分支,又是中药制药工程中的重要组成之一。

中药生产过程中所包括的步骤通常分为两大类。一类是以化学处理为主的过程,在反应器内进行反应,它们的制造方法、工艺流程、操作原理及反应装置均有很大差别,此类过程不属于本书的讨论范畴。另一类是以没有发生化学反应的纯物理过程的加工处理为主。为了使中药制药过程能经济、有效地进行,以获得合乎要求的产品,在各种加工过程中,除了化学反应外,还有许多基本的物理过程,称为单元操作。例如,对品种繁多的原料,绝大多数为植物、动物、矿物等天然产物,这些药物原料在应用之前必须进行必要的加工与处理,使它们的形状与物理性质发生变化,以达到所需的水分、纯度、浓度和压力等,这些过程称为原料的预处理。在预处理过程中,要根据原料来源以及工艺路线的要求,分别采用若干单元操作,如原料的粉碎、筛分、混合、输送和传热等。与此相同,物料的产品需要配合相应的加工过程,对产品提纯、精制等后处理加工,如采用沉降、分离、提取、蒸发、蒸馏和干燥等典型的单元操作。

在实际生产过程中,预处理与后处理过程中的单元设备数量较多,占着工厂中的大部分设备投资费用和操作费用,因此,它们在生产过程中占有一定的地位,是中药制药过程中不可缺少的环节。

一个工艺制造过程从原料到产品,是由若干个单元操作串联而成。而每一个单元操作都是在一定的设备内进行的。不同的工艺过程存在着较多的单元操作的共性,如操作原理、方法及设备。这些单元操作在理论上和技术上均可相互沟通,相互借鉴,掌握了这些内容,就可以起到举一反三的作用。例如,中药制药过程中的喷雾干燥与食品工业、化学工业中的喷雾干燥都是应用干燥这一单元操作来实现的;又如,中药生产中提取液的浓缩与酿造工业中的乙醇的提纯都是通过蒸馏方法来完成的。从工业角度来看,这是两个截然不同的过程,各有其独特的工艺条件,但从所采用的单元操作角度来看,无论是干燥操作还是蒸馏操作,它们在基本原理、设备类型、设计方法、过程放大、操作控制等方面均具有共同的规律性,即工程原理与设备相似。归纳起来,单元操作应具有下列共同的特点:

(1) 单元操作纯属物理性的操作,它们只能改变物料的状态或物理性质,其化学性质保持不变。

(2) 同类单元操作其基本原理相同,操作设备往往可以通用。

(3) 不同生产过程可以由共有的单元操作组合而成。

工业上常用的单元操作很多,本书所讨论的有关中药制药工程原理与设备,系根据其内在理论基础,从物理本质上来分类,大致可归纳为:动量传递、热量传递和质量传递三类,即称为“三大传递”过程,亦称“三传”。这是研究本书的理论基础。

一、本课程的性质任务和内容

《中药制药工程原理与设备》是中药制药专业学生必修的专业基础课。其主要任务是研究中药生产中的单元操作的基本原理、典型设备结构、选型及其工艺尺寸计算。培养学生运用基础理论分析和解决有关单元操作中各种工程实际问题的能力。

本书主要讨论以下内容：

(1) 动量传递过程是研究流体力学为基础的基本规律，如流体输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌等。

(2) 热量传递过程是研究热量传递的基本规律为基础及其单元操作，如加热、冷却、蒸发等。

(3) 质量传递过程是研究物质通过相界面的迁移过程的基本规律，如蒸馏、干燥、固液提取等。

(4) 机械过程是研究以机械力学为主要理论基础的过程，如粉碎、筛分、混合、固体输送、成型等。

此外，本书还介绍了工艺设计部分。

二、教学目的

通过本课程的学习，可培养学生掌握中药典型设备的基本原理、类型、结构、选型及其计算等有关知识，能运用于选型、开发、设计和操作。

(1) 选型 熟悉中药制药设备的基本知识，加强理论与实践联系。根据各单元操作在技术和经济上的特点，进行分析、评价选择优惠的操作条件或经济而适用的单元设备，以满足中药制药工艺的要求。

(2) 开发 开发就是将实验室的试验结果推广应用于实际生产过程中。放大就是将小型或中型试验扩大为工厂规模生产。过程的开发或放大是评价科研成果的重要标志。通过学习本课程，有助于指导学生进行科研和实验优化工作探索最佳流程和设备，确定最佳的操作条件，使科研取得更佳成果。

(3) 设计 根据已规定设备应具有的性能，对过程或设备进行计算和设计，选取合适的型式，确定其主要尺寸，或在缺乏数据的情况下进行实验，为设计提供必要的数据。

(4) 操作 熟悉操作原理，寻找适宜的操作条件，探索强化过程及节能措施。

三、几个基本概念

在分析单元操作中，经常用到物料衡算、热量衡算、过程平衡与速率和经济核算等几个基本概念，它贯串于本课程的始终，在这里仅作简单介绍。

1. 物料衡算

根据质量守恒定律，在某一设备输入物料质量减去从设备输出物料质量，等于累积在设备里的物料质量，即：

$$\sum G_{\text{入}} - \sum G_{\text{出}} = G \quad (0-1)$$

式中 $\sum G_{\text{入}}$ ——输入物料质量的总和，

$\sum G_{\text{出}}$ ——输出物料质量的总和，

G ——累积物料质量。

式(0-1)是物料衡算的通式,它适用于任何指定的空间范围,并适用于过程所涉及的全部物料,当没有化学变化时,混合物的任一组分都符合于这个通式;有化学变化时,其中各元素仍然符合于这个通式。

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累积,即 $G=0$,式(0-1)可简化为:

$$\sum G_{\text{入}} = \sum G_{\text{出}}$$

用物料衡算式可先定出衡算范围,规定一个基准。间歇过程以一次(一批)操作为基准,对于连续过程,则以单位时间为基准。

2. 热量衡算

热量衡算是能量衡算的一种形式,热量衡算的理论基础是能量守恒定律。根据此定律可以引出热量衡算表达式,即:

$$\sum Q_{\text{入}} - \sum Q_{\text{出}} = Q \quad (0-2)$$

式中 $\sum Q_{\text{入}}$ ——输入系统的热量;

$\sum Q_{\text{出}}$ ——输出系统的热量;

Q ——系统向环境散失的热量,或称热损失。

式(0-2)中输入系统的热量应包括外界加入热量、反应物带入热量、放热反应所放出热量;输出系统的热量应包括反应产物带走的热量、吸热反应吸收热量、热损失等。

热量衡算的步骤与物料衡算基本相同。

3. 过程平衡与速率

(1) 过程平衡 表明过程进行的方向和能够达到的极限。例如连通器中的液面最终是处于同一水平面,换热的极限是换热终了时冷热液体温度相同。因此,利用平衡条件,可以找出当时条件下物料或能量利用的极限,为确定工艺方案提供依据。还可以用实际操作条件结果与平衡数据的比较作为衡量过程的效率,从而找出改进实际操作的方法。

(2) 过程速率 即过程进行的快慢。过程速率决定设备的生产能力。显然,过程速率越高,单位设备体积的生产能力越大。过程速率可以用如下的基本关系表达,即:

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

过程推动力是指过程在某瞬间距平衡的差额,它可以是压力差、温度差或浓度差。增大过程的推动力或减小过程的阻力均可提高过程速率。当过程推动力一定时,要提高过程速率,应考虑降低过程阻力来实现,其措施不应降低物料和能量利用率,或引起副反应或副作用发生,也不宜增加过多的设备。

4. 经济核算

在设计具有一定生产能力的设备时,根据设备型式、材料不同,可提出若干个设计方案。对同一设备,选用操作参数不同,直接影响到设备费和操作费。因此,要用经济核算确定最经济的设计方案。

四、单位制与单位换算

1. 单位制

在科学技术与生产发展的过程中,由于历史的原因形成了不同的单位制,分为两类:绝对制(如物理制)单位和重力制(工程制)单位,这两类单位制又分为英制与米制单位。

过去常用的几种单位制所用的基本量与基本单位列于表 0-1 中。

表 0-1 绝对单位制与重力单位制

	长 度	时 间	质 量	力
绝对单位制				
CGS 制(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

这些单位制并行使用,在科学技术领域和国际交往中带来了很大的不便,为改变这种局面以统一计量单位制,在 1960 年 10 月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 是在 MKS 制基础上发展起来的,共规定了 7 个基本单位,除了 MKS 制中原有单位 m(米)、时间单位 s(秒)和质量单位 kg(千克)外,还加上热力学温度单位 k(开尔文)、电流单位 A(安培)、光强度单位 cd(坎德拉)和物质的量单位 mol(摩尔)。这些单位都有格的科学定义。国际单位制有两大优点:一是它的通用性,所有物理量的单位都可由 SI 7 个基本单位导出;二是它的一贯性,任何一个 SI 导出单位都可通过上述 7 个基本单位相乘或相除而导出。SI 中每种物理量只有一个单位,如热、功、能三者的单位都采用 J(焦耳),转换时无需换算因数。

目前国际单位制已为世界各国广泛采用。以国际单位制为基础,国务院制订了中华人民共和国法定计量单位现已正式实施,所以本书采用法定计量单位。

2. 单位换算

同一物理量若用不同单位度量时,其数值应相应地改变。这种换算称为单位换算。单位换算时,需要换算因数。各单位的换算因数参见本书附录。现将单位换算举例如下:

例 0-1 4°C 时水的密度用物理单位制表示为 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$,换成法定计量单位制。

解:先列出有关各量不同单位间的关系:

$$1\text{m}=100\text{cm} \quad 1\text{kg}=1000\text{g}$$

$$\begin{aligned} 1.00\text{g}/\text{cm}^3 &= \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \\ &= \frac{1\text{kg}}{\text{cm}^3 \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right)^3} \\ &= 1000\text{kg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

例 0-2 已知 $1\text{atm}=1.0133\text{kgf}/\text{cm}^2$,试改用国际单位制。

解:先列出有关各量不同单位间的关系:

$$1\text{kgf}=9.81\text{N} \quad 1\text{cm}^2=10^{-4}\text{m}^2$$

$$\begin{aligned} 1\text{atm} &= 1.0133\text{kgf}/\text{cm}^2 = 1.0133 \frac{\text{kgf} \times 9.81\text{N}/\text{kgf}}{\text{cm}^2 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{cm}^2} \\ &= 1.0133 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$=1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$$

例 0-3 水分自静止的水面蒸发到空气中的速率可用下式描述:

$$G=2.45u^{0.8}\Delta p'$$

式中 u ——水面上空气的流速, ft/s;

Δp ——在该空气温度下水的饱和蒸气压与空气中水蒸气分压之差, atm;

G ——水分蒸发速率, lb/(ft²·h)。

试将上式加以换算 SI 制单位, 即 G 以 kg/(m²·s)、 u 以 m/s、 Δp 以 Pa 表示。

解: 本题不是一个一般物理量的单位换算, 而是将一个英制单位表示的经验式转换成以 SI 单位表示的经验式。其转换规则是将式中每一物理量通过换算因数, 将以英制单位表示的物理量转换为 SI 单位。经过换算, 公式中系数值将改变。从附录中查出:

$$1\text{ft}=0.3048\text{m}$$

或

$$1\text{ft/s}=0.3048\text{m/s}$$

令 u 表示以 ft/s, u' 表示以 m/s, 则 u 与 u' 的关系为:

$$u=\frac{u'}{0.3048} \quad (a)$$

又从附录查出:

$$1\text{atm}=1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$$

令 Δp 表示以 atm, $\Delta p'$ 表示以 Pa, 则 Δp 与 $\Delta p'$ 的关系为:

$$\Delta p=\frac{\Delta p'}{1.0133 \times 10^5} \quad (b)$$

再从附录查出:

$$1 \text{ lb}=0.4536\text{kg}$$

再算出

$$\begin{aligned} 1 \text{ lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) &= 1 \left[\frac{1\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \right] \left[\frac{0.4536\text{kg}}{1 \text{ lb}} \right] \left[\frac{1\text{ft}}{0.3048\text{m}} \right]^2 \left[\frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right] \\ &= \frac{0.4536}{0.3048 \times 3600} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \\ &= 1.356 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

令 G 表示以 lb/(ft²·h) 为单位, G' 表示以 kg/(m²·s) 为单位, 则 G 与 G' 的关系为:

$$G=\frac{G'}{1.356 \times 10^{-3}} \quad (c)$$

将 (a)、(b)、(c) 代入题给的关系式中, 得:

$$\frac{G'}{1.356 \times 10^{-3}} = 2.45 \left[\frac{u'}{0.3048} \right]^{0.8} \left[\frac{\Delta p'}{1.0133 \times 10^5} \right]$$

略去各物理量上标, 并整理得:

$$G'=8.48 \times 10^{-8} u^{0.8} \Delta p$$