

国外优秀食品科学与工程专业教材

食品工程导论

(第三版)

[美] R.Paul Singh Dennis R.Heldman 著

许学勤 译

Introduction to Food Engineering

 中国轻工业出版社

食品工程导论 (第三版)

R. 保罗·辛格, 加利福尼亚大学戴维斯分校

丹尼斯 R. 赫尔德曼, 罗格斯大学新布朗斯维克分校

《食品工程导论》(第三版)以一种独特和开创性的原理与应用结合在一起的方式, 简洁明了地介绍了食品加工单元操作中的工程概念。两位作者在食品工程教学方面具有多年的经验, 这次他们再度合作, 以逻辑和精心设计的方式, 将这一极为重要的课程展现给了食品科学类的学生。

全书包括十二章, 每章由基本原理的应用引出, 内容包括了与过程相关的量化关系、例题及解题, 以及用于考察学生掌握程度的习题。这种结构要求并鼓励学生经过一个分析和解决问题的过程, 重点强调利用例题进行原理的应用。

《食品工程导论》(第三版)涉及的内容直接与典型食品工程课程对应, 并包括了作者挑选的旨在介绍工程原理与食品化学、食品微生物学、食品营养和食品加工关系的内容。一些主题既包括了传统食品也包括了当代食品加工操作的内容。

第三版特色

- * 每章后有更多利用电子表求解的习题
- * 多数章节增加了求解的例题
- * 重要的算图与算表
- * 用于进行单元操作的典型设备介绍
- * 可在Web上查到的图片

本书译自原版 **Introduction to Food Engineering**, 并由 Elsevier 授权出版



ISBN 7-5019-5422-4



9 787501 954223 >

上架建议: 食品工业

ISBN 7-5019-5422-4/TS·3161

定价: 54.00元


国外优秀食品科学与工程专业教材

食品工程导论

(第三版)

[美] R. Paul Singh Dennis R. Heldman 著

许学勤 译

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

食品工程导论:第三版/(美)辛格(Singh, R. P.),
(美)赫尔德曼(Heldman, D. R.)著;许学勤译. —北京:中国
轻工业出版社, 2006. 8

国外优秀食品科学与工程专业教材

ISBN 7-5019-5422-4

I. 食... II. ①辛... ②赫... ③许... III. 食品工程学—
高等学校—教材 IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 047252 号

Introduction to Food Engineering, 3rd edition

R. Paul Singh, Dennis R. Heldman

ISBN: 0-12-646384-0, 978-0-12-646384-2

Copyright ©2001 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 981-259-627-5, 978-981-259-627-7

Copyright ©2006 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by China Light Industry Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act.

Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由中国轻工业出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港特别行政区及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

责任编辑:伊双双

策划编辑:李亦兵 责任终审:滕炎福 封面设计:刘鹏

版式设计:马金路 责任校对:燕杰 责任监印:张可

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印刷:利森达印务有限公司

经销:各地新华书店

版次:2006年8月第1版第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:27

字数:623千字

书号:ISBN 7-5019-5422-4/TS·3161

定价:54.00元

著作权合同登记 图字:01-2006-1076

读者服务部邮购热线电话:010-65241695 85111729 传真:85111730

发行电话:010-85119817 65128898 传真:85113293

网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

51089K1X101ZYW

作者简介

R. 保罗·辛格和丹尼斯 R. 赫尔德曼合作编写的《食品工程导论》，自 1984 年首次出版以来一直受到欢迎，两人在此再次合作推出了此书的第三版。辛格和赫尔德曼博士具有多年为本科生和研究生讲授食品工程方面课程的教学经历，这些经历与辛格博士在食品加工行业方面工作经验的融洽结合也在书中再次得到了体现。作者精心选择的编写题材，可使学生和教师全方位地受益于这种结合型知识。

辛格是加利福尼亚大学戴维斯分校的食品工程教授，自 1975 年以来，他一直在该校为本科生和研究生教授食品工程方面的课程。1986 年，他获得了美国农业工程师学会 (ASAE^①) 授予的青年教育工作者奖。1997 年他被美国乳品和食品供应商协会和 ASAE 共同授予杰出食品工程奖，在获奖词中他被称为“在学术声望和国际食品工程服务方面的世界级科学家和教育工作者”。1988 年，他由于在促进国际食品科技交流方面所做出的杰出贡献，被食品工艺师学会 (IFT^②) 授予国际奖。2000 年，他同时当选为 IFT 和 ASAE 特别会员。他先后帮助葡萄牙、印度尼西亚、阿根廷和印度建立食品工程研究项目，并且先后在 36 个国家作了大量的食品工程方面的学术报告。辛格前后编写或合作编写了 13 本书，并发表了 200 多篇研究论文。他在戴维斯的研究范围涉及食品性质测量和应用数学模拟方法进行传热传质研究。

赫尔德曼目前是罗格斯大学(新泽西州立大学)的食品加工工程教授。过去两年，他在这所学校为本科生和研究生讲授食品工程方面的课程。他的研究兴趣集中在运用模型预测食品的热物理性质以及为食品加工操作开发过程模拟模型。1998 年以前，他是美国密苏里大学的食品加工工程教授。在此期间，他还在面向 21 世纪的食品、饲料和相关制品研究项目、食品科学与工程单位，以及农业增值发展项目等方面担任管理性领导职务。赫尔德曼在密苏里大学的 6 年中，为食品科学的本科生讲授食品工程课程。在 1984 年到 1992 年间，赫尔德曼在金宝汤公司、国家食品加工者学会和温伯格咨询有限公司从事管理工作。1984 年以前，赫尔德曼在密西根州立大学进行了近 20 年的教学和科研工作。他先后获得过 1981 年度 DFISA^③ - ASAE 的食品工程奖和 1974 年度 ASAE 的青年研究奖。赫尔德曼先后被评为 IFT 1981 年度荣誉会员和 ASAE 1998 年度荣誉会员。

① ASAE, American Society of Agricultural Engineers(美国农业工程师学会)的缩写。——译者注。

② IFT, Institute of Food Technologists(食品工艺师学会)的缩写。——译者注。

③ DFISA, Dairy and Food Industries Supply Association(乳制品工业供应协会)的缩写。——译者注。

序

食品工业是一个总收入次于信息业的大产业。为了满足已经超过 60 亿的世界人口的增长需要,它以飞快的速度发展。农业相关领域的进展使食物生产率取得了前所未有的水平。人类既需要安全的食品,也需要高质量、方便和保健的食品。食品科学家一直面临满足这些需求的挑战。从原料到成品的食品加工过程涉及许多加工操作,这些操作均按量化方式进行,并需要众多工程方面的配合,以使得产品在保留品质、提高安全性、增加方便性、改善功能性和延长货架寿命等方面获得成功的平衡。

食品工程涉及包括热力学、流体力学和传热传质在内的所有经典工程学科,也与物理化学、生物过程和材料科学有关。了解食品加工过程的基础工程问题对于食品工业发展是至关重要的,食品科学教育不仅要对本科生,而且也要对研究生进行工程学科领域的拓宽。生物化学家、微生物学家、营养学家、风味化学家、感官评定科学家和毒理学家均有必要了解现代食品加工的工程原理知识。

辛格博士和赫尔德曼博士在第三版中,继续采用了先作原理应用方面的描述,再展开过程量化关系式的方式进行编写——业已证明这是一种极好的工程原理教学技巧。作者在第三版的整个编辑中利用了信息技术,而且在辛格博士的网站还提供了大量的图示例子。

自从第一版出版以来,辛格和赫尔德曼的食品工程导论教材就成了食品工程学术界和食品工业界的规范。此书第三版不仅仍将保持这一传统,而且也相当有可能成为其他学科领域的表述规范。

感谢作者邀请本人为此书写序从而能为此学术成果做点贡献。我也深深地感谢作者在帮助建立食品工程标准和使得这一标准完美化方面,在他们的职业生涯中所做的无私努力。

北卡罗来纳州立大学食品科学系
William Neal Reynolds 教授和主任
Ken Swartzel 教授

前 言

食品科学专业的本科课程表通常安排用一年的时间学习食品工程内容的课程。教授这些内容所面临的挑战在于向工程科学背景知识有限的学生介绍工程概念、原理及其应用。我们的目标是给学生提供足够的工程概念背景知识和经验,以使他们能够和工程专业人员方便地进行沟通。

本书是供食品科学本科生使用的食品工程课程教科书。书中所选择内容是与各类食品应用关系最密切的处理、加工、包装和配送过程中的工程应用问题。对于开始转入更专门化应用的学生来说,在本科生主干课中加入这些内容应该是有益的。通过解题来介绍原理,可以培养学生在估算和信息沟通方面运用量化手段的信心。

本书内容涵盖了从以基础物理学为基础的各种基本工程原理到食品加工的各种应用。前四章介绍物料衡算、能量平衡、热力学、流体流动、能量守恒和能量传递方面的概念。随后的几章讲述了这些概念在食品保藏加工、制冷、冷冻和热蒸发浓缩中的应用。有两个章节介绍与物理化学和传质有关的基本概念,紧接着是有关膜分离和脱水的章节。

本次编辑的书中包括了前两版中的许多特点。本书的每一章都包含了适量描述性内容,以帮助学生形象地理解各种概述和原理的应用。强调运用方程解决实际问题,而省略了许多关键表达式的推导过程。每章列举了许多描述解决实际问题所需步骤的例子。有些例子介绍了使用电子表格解题的方法。在每章的结尾,为学生提供了一组习题的清单。还如前两版本那样,特别标出了较难解的题目。

第三版有几个新的特点。最明显的变化是版面格式变了。我们希望这些格式上的变化会有助于学生对较难理解概念的认识。有几章中,一些概念用了较大篇幅进行详细介绍。此外,还介绍了几则主体设计型的问题,这样为学生利用不同方法概念解决问题提供了训练机会。

本书的主要使用者是为食品科学方向本科生讲授食品工程课程的教学人员。本版以合著者近 60 年积累的教学经验为基础。应当鼓励学生利用此书作为每一介绍的内容的学习指南。有些学生也可以通过对概念和原理的自学能够解答每章后面的习题。许多学生则需要得到足够的教师帮助才能理解有关原理和解答每章的习题。书中信息的组织结构为教学人员提供了最大程度的授课内容选择。

本书的内容可以各种形式重新组织成两阶段课程内容。第 1 章到第 4 章的内容必须包括在第一阶段的课程中。这一部分的内容包含了诸如从第 5 章到第 8 章应用性章节内容的基础背景。第一阶段的课程也可以强调基础性的内容,并包括第 9 章和第 10 章的内容。第 5、6、7、8、11 和 12 章的内容与专门的加工应用有关,因此是优良的加工基础主干课程内容。

作者感谢过去 20 年中为此书的完善做出贡献的众多人员。这中间有许多是用过此

书前两版本的教学同事,他们在此书内容和格式方面提供了很有价值的宝贵意见。最重要的贡献者中还有部分是使用过此书作为教科书的学生,他们提出了将书编得更好的反馈建议。尤其要感谢巴巴拉·梅亨利女士在此书编辑和绘图方面所作的贡献。

R. 保罗·辛格
丹尼斯 R. 赫尔德曼

目 录

1 引言	(1)
1.1 量纲	(1)
1.2 工程单位	(1)
1.3 系统	(7)
1.4 系统状态	(8)
1.5 密度	(9)
1.6 浓度	(10)
1.7 水分含量	(12)
1.8 温度	(14)
1.9 压强	(15)
1.10 焓	(17)
1.11 状态方程和理想气体定律	(17)
1.12 水的相图	(18)
1.13 质量守恒	(18)
1.14 物料衡算	(21)
1.15 热力学	(26)
1.16 热力学定律	(26)
1.17 能量	(27)
1.18 能量平衡	(28)
1.19 闭口系统的能量平衡	(29)
1.20 开口系统的能量平衡	(34)
1.21 总能量平衡	(35)
1.22 功率	(37)
1.22 面积	(37)
1.24 传感器动力学响应特征	(38)
习题	(40)
符号	(41)
参考文献	(42)
2 食品加工过程中的流体流动	(43)
2.1 液体输送系统	(43)
2.2 液体性质	(47)
2.3 牛顿液体的处理系统	(53)
2.4 管内流动元的力平衡——柏努利方程的导出	(65)

2.5	流体稳定态流动的能量方程	(69)
2.6	泵的选择和性能评价	(77)
2.7	流量测量	(86)
2.8	黏度测量	(93)
2.9	非牛顿流体的流动特性	(98)
	习题	(107)
	符号	(109)
	参考文献	(111)
3	食品加工过程的能量	(113)
3.1	蒸汽发生	(113)
3.2	燃料利用	(125)
3.3	电能利用	(128)
	习题	(133)
	符号	(134)
	参考文献	(135)
4	食品加工过程中的传热	(136)
4.1	食品的加热和冷却系统	(136)
4.2	食品的热性质	(141)
4.3	传热模型	(145)
4.4	稳定态传热	(150)
4.5	非稳定态传热	(184)
4.6	微波加热	(202)
	习题	(207)
	符号	(214)
	参考文献	(216)
5	保藏加工	(218)
5.1	微生物残存曲线	(218)
5.2	外部因素的影响	(219)
5.3	热致死时间 F	(221)
5.4	腐败概率	(221)
5.5	杀菌过程计算的一般方法	(222)
5.6	数学方法	(231)
	习题	(234)
	符号	(235)
	参考文献	(236)
6	制冷	(238)
6.1	制冷剂的选择	(238)
6.2	制冷系统设备	(240)

6.3	压焓图	(246)
6.4	蒸汽压缩制冷分析中有用的数学表达式	(250)
6.5	多级制冷系统	(259)
	习题	(261)
	符号	(263)
	参考文献	(264)
7	食品冷冻	(265)
7.1	冷冻系统	(265)
7.2	冷冻食品性质	(270)
7.3	冷冻时间	(271)
7.4	冷冻食品的贮藏	(281)
	习题	(283)
	符号	(285)
	参考文献	(286)
8	蒸发	(288)
8.1	沸点升高	(289)
8.2	蒸发器类型	(290)
8.3	单效蒸发器的设计	(293)
8.4	多效蒸发器的设计	(296)
8.5	蒸汽再压缩系统	(300)
	习题	(301)
	符号	(302)
	参考文献	(303)
9	湿空气性质	(304)
9.1	干空气的性质	(304)
9.2	水蒸气的性质	(305)
9.3	湿空气的性质	(306)
9.4	空气性质图	(311)
	习题	(315)
	符号	(317)
	参考文献	(318)
10	传质	(319)
10.1	扩散过程	(319)
10.2	非稳定态传质	(329)
10.3	包装材料中的传质	(334)
	习题	(338)
	符号	(339)
	参考文献	(340)

11 膜分离	(341)
11.1 电渗析系统	(342)
11.2 反渗透膜分离系统	(344)
11.3 膜分离操作	(348)
11.4 超滤膜系统	(349)
11.5 浓度极化	(350)
11.6 反渗透和超滤系统的类型	(354)
习题	(356)
符号	(357)
参考文献	(358)
12 干燥	(360)
12.1 基本干燥过程	(360)
12.2 干燥系统	(364)
12.3 干燥系统设计	(367)
习题	(377)
符号	(380)
参考文献	(381)
附录	(383)
A.1 SI 单位制及换算因子	(383)
A.2 食品的物理性质.....	(387)
A.3 非食品材料的物理性质.....	(394)
A.4 水和空气的物理性质.....	(399)
A.5 湿空气图.....	(404)
A.6 压-焓数据.....	(406)
A.7 食品加工过程设备图例(符合英国和美国标准).....	(416)
A.8 其他.....	(418)
参考文献	(420)

1 引 言

对于大多数食品工业中的通用单元操作原理的理解,需要借助于物理学、化学和数学方面的知识。例如,如果要求一位食品工程师设计一个涉及到加热和冷却的食品加工过程,那么,他就必须对决定传热的物理原理有很好的了解。通常要求工程师的工作是量化的,因此,使用数学的能力是最基本的。加工会造成食品变化,这种变化可以是物理的、化学的、酶学的或者是微生物学方面的变化。通常,有必要了解加工过程中发生的化学变化的动力学行为。对于食品过程的设计和分析必须了解这方面的定量信息。在学习食品工程原理以前,希望学生已经修过数学、化学、物理学方面的基础课程。在本章中,我们将复习一些对于食品工程而言有重要作用的物理和化学概念。

1.1 量 纲

可见和/或可测量的物理存在可以通过量纲定量描述。例如,时间、长度、面积、体积、质量、力、温度和能量都是量纲。量纲的大小由单位来表达;长度的单位可以用米、厘米或毫米来表示。

基本量纲,如长度、时间、温度和质量表示一个物理存在。次级量纲由基本量纲结合而成(如体积是长度的三次方,速度是距离除以时间)。

方程必须使量纲保持一致。因此,如果一个方程左侧的量纲是“长度”,那么方程右侧的量纲也必须是“长度”。这是一个检查方程正确与否的好方法。在解数值问题时,在方程中写出每一量纲的单位也有助于避免计算时出错。

1.2 工 程 单 位

物理量可由许多单位制来度量。最常用的单位制包括英制、厘米克秒(cgs)制和米千克秒(mks)制。然而,由于必须用无数的符号来代表单位,因此使用这些单位制经常会造成大量的混乱。国际组织曾试图统一不同的单位制、符号和相关的数量。国际单位(SI)制是国际协议的结果。以下将要讨论的 SI 单位由 7 个基本单位、2 个补充单位和一系列导出单位构成。

1.2.1 基 本 单 位

SI 制的基础是 7 个明确定义的单位,这些单位约定俗成地被认为在量纲上是独立的。七个基本单位的定义如下:

(1) 长度单位(米): 米(m)等于氪-86 原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级间跃迁辐射真空波长

的 1 650 763. 73 倍的长度^①。

(2) 质量单位(千克): 千克(kg)等于国际千克原器的质量(国际千克原器是一个特制的铂-铱合金的圆柱体,此原器现由国际质量和计量局保存在法国塞维汉的拱形容器中)。

(3) 时间单位(秒): 秒(s)是铯-133 原子基态的两个超精细能极之间跃迁所对应辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间。

(4) 电流单位(安培): 安培(A)是一恒定电流,若保持在处于真空中相距 1m 的两无限长而圆截面可忽略的平行直导线内,则在此两导线之间产生的力在每米长度上等于 $2 \times 10^{-7} \text{N}$ 。

(5) 热力学温度单位(开尔文): 开尔文(K)是水三相点热力学温度的 1/273. 16。

(6) 物质的量单位(摩尔): 摩尔(mol)是一系统的物质的量,该系统所包含的基本单元数与 0. 012kg 碳-12 的原子数目相等。

(7) 照度单位(坎德拉): 坎德拉(cd)是在 101 325N/m² 压强下,处于铂凝固点温度的黑体的 1/600 000m² 表面在垂直方向上的发光强度。

表 1. 1 列出了以上基本单位及它们的符号。

表 1. 1 SI 制基本单位

现象或事件的可测量属性	名称	符号	现象或事件的可测量属性	名称	符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文]	K
质量	千克	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s	发光强度	坎[德拉]	cd
电流	安[培]	A			

1. 2. 2 导出单位

导出单位是基本单位乘除得到的代数组合。为了简化起见,导出单位通常使用专用名称和符号,这些名称和符号还可以用来得到别的导出单位。以下为一些常见导出单位的定义:

(1) 牛顿(N): 牛顿是给 1kg 质量以 1m/s^2 的加速度所需的力。

(2) 焦耳(J): 焦耳是在 1N 的力作用方向上位移 1m 所做的功。

(3) 瓦特(W): 瓦特是以 1J/s 的速率产生能量的功率。

(4) 伏特(V): 伏特是 1A 恒定电流通过正好消耗 1W 功率的导线两点间的电势差。

(5) 欧姆(Ω): 欧姆是 1V 的恒定电压作用于非电动力源导体,在导体两点间产生 1A 电流时的电阻。

(6) 库仑(C): 库仑是由 1A 电流输送的电量。

(7) 法拉第(F): 法拉第是一个在两个平板间的电压为 1V、带 1C 电量的电容器的电容量。

^① 这种米的定义已废除。

米是光在真空中(1/299 792 458)s 时间间隔内所经路径的长度。——译者注。

(8) 亨利(H): 亨利是封闭环以 1A/s 速率变化产生 1V 电动势时的感应系数。

(9) 韦伯(Wb): 韦伯是只有一个环路的磁通量,它在 1s 时间间隔内均匀地减少到零时,环路中产生 1V 的电位差。

(10) 流明(lm): 流明是发光强度为 1cd 的点光源照在单位立体角(1 球面度)内发出的光通量。

表 1.2、表 1.3 和表 1.4 分别给出了以基本单位、带专用名的 SI 导出单位和用专门名称表示的 SI 导出单位表示的 SI 导出单位的例子。

表 1.2 以基本单位表示的 SI 导出单位例子

物理量	SI 单位		物理量	SI 单位	
	名称	符号		名称	符号
面积	平方米	m ²	电流密度	安/米 ²	A/m ²
体积	立方米	m ³	磁场强度	安/米	A/m
速度	米/秒	m/s	浓度	米 ³ /摩尔	mol/m ³
加速度	米/秒 ²	m/s ²	比体积	米 ³ /千克	m ³ /kg
密度,质量密度	千克/米 ³	kg/m ³	流明	坎/米 ²	cd/m ²

表 1.3 使用专用名的 SI 导出单位例子

物理量	名称	符号	SI 单位	
			用其他单位表示	用 SI 基本单位表示
频率	赫[兹]	Hz		s ⁻¹
力	牛[顿]	N		m·kg·s ⁻²
压强、应力	帕斯卡	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
能量,功,热量	焦耳	J	N/m	m ² ·kg·s ⁻²
功率,辐射能量	瓦特	W	J/s	m ² ·kg·s ⁻³
电量,电势	库仑	C		s·A
电位差,电动势	伏特	V	W/A	m ² ·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹
电容	法拉第	F	C/V	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ⁴ ·A ²
电阻	欧姆	Ω	V/A	m ² ·kg·s ⁻³ ·A ⁻²
电导	西门子	S	A/V	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ³ ·A ²
摄氏温度	摄氏度	℃		K
照明能量	流明	lm		cd·sr
照度	勒克斯	lx	lm/m ²	m ⁻² ·cd·sr

表 1.4 通过专用名导出单位导出的导出单位例子

物理量	SI 单位		
	名称	符号	SI 基本单位表示
动力黏度	帕·秒	Pa·s	m ⁻¹ ·kg·s ⁻¹
力的动量	牛·米	N·m	m ² ·kg·s ⁻²

续表

物理量	SI 单位		
	名称	符号	SI 基本单位表示
表面张力	牛/米	N/m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
功率密度, 热流密度, 辐射强度	瓦/米 ²	W/m ²	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$
热容量, 嫡	焦/开	J/K	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
比热容	焦/(千克·开)	J/(kg·K)	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$
比能	焦/千克	J/kg	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
热传导率	瓦/(米·开)	W/(m·K)	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$
能量密度	焦/米 ³	J/m ³	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
电场强度	伏/米	V/m	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
电荷密度	库/米 ³	C/m ³	$\text{m}^{-3}\cdot\text{s}\cdot\text{A}$
电流密度	库/米 ²	C/m ²	$\text{m}^{-2}\cdot\text{s}\cdot\text{A}$

1.2.3 辅助单位

这类单位包含两个纯几何单位, 它们可以看作基本单位, 也可看作导出单位。

(1) 单位平面角(弧度): 弧度(rad)是一个圆的两条半径所夹的圆弧等于半径长度时的夹角。

(2) 单位立体角(球面度): 球面度(sr)是一个顶点位于球心, 正好将球面切出一个与球半径平方相等面积的立体角。

辅助单位列于表 1.5。

表 1.5

SI 辅助单位

物理量	SI 单位		物理量	SI 单位	
	名称	符号		名称	符号
单位平面角	弧度	rad	单位立体角	球面度	sr

例 1.1 将以下单位值转换成 SI 单位的值:

- (1) 60 lb_m/ft³ 的密度值转成 kg/m³ 值
- (2) 1.7 × 10³ Btu 能量值转成 kJ 值
- (3) 2 475 Btu/lb_m 的焓值转成 kJ/kg 值
- (4) 14.69 psig 的压强值转成 kPa 值
- (5) 20 cP 的黏度值转成 Pa·s 值

解:

我们分别用列于附录表 A.1.2 中的单位转换因子进行转换

(1) 虽然可以直接利用表 A.1.2 中的密度转换的因子: 1 lb_m/ft³ = 16.0185 kg/m³, 但我们在此先分别将每一量纲进行转换。因为

$$1 \text{ lb}_m = 0.45359 \text{ kg}$$

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

所以

$$(60\text{lb}_m/\text{ft}^3)(0.45359\text{kg}/\text{lb}_m)\left(\frac{1}{0.3048}\text{m}/\text{ft}\right)^3 = 961.1\text{kg}/\text{m}^3$$

另一种应用转换因子直接进行换算的方法为

$$\frac{(60\text{lb}_m/\text{ft}^3)(16.0185\text{kg}/\text{m}^3)}{1\text{lb}_m/\text{ft}^3} = 961.1\text{kg}/\text{m}^3$$

(2) 对于能量

$$1\text{Btu} = 1.055\text{kJ}$$

所以

$$\frac{(1.7 \times 10^3\text{Btu})(1.055\text{kJ})}{1\text{Btu}} = 1.8 \times 10^3\text{kJ}$$

(3) 对于焓,每一量纲的换算因子分别为:

$$1\text{Btu} = 1.055\text{kJ}$$

$$1\text{lb}_m = 0.45359\text{kg}$$

所以

$$(2475\text{Btu}/\text{lb}_m)(1.055\text{kJ}/\text{Btu})\left(\frac{1}{0.45359\text{kg}/\text{lb}_m}\right) = 5757\text{kJ}/\text{kg}$$

另一种应用转换组合因子 $1\text{Btu}/\text{lb}_m = 2.3258\text{kJ}/\text{kg}$ 直接进行换算的方法为

$$\frac{(2475\text{Btu}/\text{lb}_m)(2.3258\text{kJ}/\text{kg})}{1\text{Btu}/\text{lb}_m} = 5756\text{kJ}/\text{kg}$$

(4) 对于压强

$$\text{psia} = \text{psig} + 14.69$$

表压 14.69psig 首先转化成绝对压强 psia (详见 1.9 有关表压与绝对压强的讨论)

$$14.69\text{psig} + 14.69 = 29.38\text{psia}$$

每一量纲的单位换算如下

$$1\text{lb}_f = 4.4482\text{N}$$

$$1\text{in} = 2.54 \times 10^{-2}\text{m}$$

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

因此

$$\begin{aligned} (29.28\text{lb}/\text{in}^2)(4.4482\text{N}/\text{lb})\left(\frac{1}{2.54 \times 10^{-2}\text{m}/\text{in}}\right)^2\left(\frac{1\text{Pa}}{1\text{N}/\text{m}^2}\right) \\ = 201877\text{Pa} \\ = 201.88\text{kPa} \end{aligned}$$

另一种算法为

$$1\text{psia} = 6.895\text{kPa}$$

$$\frac{(29.28\text{psia})(6.895\text{kPa})}{1\text{psia}} = 201.88\text{kPa}$$

(5) 对于黏度

$$1\text{cP} = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$$