

国外优秀食品科学与工程专业教材

ELSEVIER

# 食品工程 导论 (第五版)

著 | 【美】R. Paul Singh  
Dennis R. Heldman

译 | 许学勤

Introduction to  
Food Engineering  
Fifth Edition

国外优秀食品科学与工程专业教材

ELSEVIER

# 食品工程 导论 (第五版)

著 | 【美】R. Paul Singh  
Dennis R. Heldman

译 | 许学勤



## 图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程导论: 第五版/ (美) 辛格, (美) 赫尔德曼著; 许学勤译. —北京: 中国轻工业出版社, 2018. 1

国外优秀食品科学与工程专业教材

ISBN 978-7-5184-0904-4

I. ①食… II. ①辛… ②赫… ③许… III. ①食品工程-高等学校-教材 IV. ①TS2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 284604 号

ELSEVIER

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road, #08-01 Winsland House I, Singapore 239519

Tel: (65) 6349-0200; Fax: (65) 6733-1817

Introduction to Food Engineering, 5e

R. Paul Singh, Dennis R. Heldman

Copyright © 2014, 2009, 2001, 1993, 1984 by Elsevier Inc. All rights reserved.

ISBN - 13: 9780123985309

This translation of Introduction to Food Engineering, fifth edition by R. Paul Singh and Dennis R. Heldman was undertaken by China Light Industry Press and is published by arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

Introduction to Food Engineering, fifth edition by R. Paul Singh and Dennis R. Heldman 由中国轻工业出版社进行翻译, 并根据中国轻工业出版社与爱思唯尔 (新加坡) 私人有限公司的协议约定出版。

《食品工程导论》(第五版) (许学勤译)

ISBN: 9787518409044

Copyright © 2018 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: [www.elsevier.com/permissions](http://www.elsevier.com/permissions).

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. and China Light Industry Press (other than as may be noted herein).

### 注意

本译本由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 和中国轻工业出版社完成。相关从业及研究人员必须凭借其自身经验和知识对文中描述的信息数据、方法策略、搭配组合、实验操作进行评估和使用。由于医学科学发展迅速, 临床诊断和给药剂量尤其需要经过独立验证。在法律允许的最大范围内, 爱思唯尔、译文的原文作者、原文编辑及原文内容提供者均不对译文或因产品责任、疏忽或其他操作造成的人身及/或财产伤害及/或损失承担责任, 亦不对由于使用文中提到的方法、产品、说明或思想而导致的人身及/或财产伤害及/或损失承担责任。

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

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

责任编辑: 苏 杨      加工编辑: 方鹏飞      策划编辑: 马 妍      责任终审: 滕炎福

封面设计: 锋尚设计      版式设计: 锋尚设计      责任校对: 晋 洁      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: 河北鑫兆源印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 41.5 字数: 960 千字

书 号: ISBN 978-7-5184-0904-4 定价: 135.00 元

邮购电话: 010-65241695 发行电话: 010-85119835 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn> Email: [club@chlip.com.cn](mailto:club@chlip.com.cn)

如发现图书残缺请与我社邮购联系调换

140947J1X101ZYW

## 作者简介

R·P·辛格和D·R·赫尔德曼再次推出了《食品工程导论》的第五版。该书自1984年首次出版以来一直保持着很高的声誉。辛格教授和赫尔德曼教授在食品工程课程教学方面有多年经历，他们的学生既有本科生也有研究生；加上赫尔德曼教授在食品加工行业的经历，这种合作方式再次在本书得到体现。作者精选的知识点及编写素材，可使学生和教师都能从这一联手推出的宝贵知识财富中受益匪浅。

辛格是美国加利福尼亚大学戴维斯分校的杰出食品工程教授，自1975年起，他先后在该校开授过多门食品工程课程。1986年，美国农业工程师学会（ASAE<sup>①</sup>）授予他青年教育工作者奖。2007年他因“食品工程教育的全球贡献”而获得岸田国际奖，并在2013年获得梅西弗格森教育奖。美国食品科学技术学会（IFT）1982年授予他塞缪尔凯特普雷斯科特研究奖，1988年授予其国际奖，并因在“食品技术领域的杰出贡献”而授予他尼古拉斯·阿佩尔奖。1997年，他取得了乳品和食品工业供应商协会和ASAE颁发的卓越食品工程奖，将其评价为“食品工程教育和服务方面杰出的世界级科学家和教育家”。2011年，辛格被工程与食品国际协会授予食品工程终身成就奖。2000年他同时被选为国际食品协会和ASAE的资深会员，2001年被选为国际食品科学院院士。他曾帮助葡萄牙、印度尼西亚、阿根廷和印度建立食品工程规划，并在世界各地40多个国家广泛讲授食品工程课程。辛格曾独立撰写或合作撰写过15本书，并发表了260多篇技术论文。他目前在加利福尼亚大学戴维斯分校利用数学模拟研究传热传质过程，并在食品供应链中寻求可持续发展性。2008年，辛格因在“食品工程研究和教育方面的创新和领导地位”而当选为美国工程院院士。

目前，赫尔德曼是在俄亥俄州立大学食品工程方面的Dale A. Seiberling特聘教授，从事提高食品加工系统效率方面的研究。此外，他还具有为教育界、工业界和政府部门提供食品加工工程方面的咨询经历。他是加利福尼亚大学戴维斯分校的兼职教授，也是密苏里大学的名誉教授。他的研究兴趣主要集中在利用模型来预测食品的热物理性质和开发用于食品加工过程的仿真模型。他单独或与人合作共发表了150多篇研究论文，是《食品工程手册》（2007年出版第二版）参编者，是《农业、食品与生物工程百科全书》（2011年第二版）的编者，也是2010年版《农业和食品生物技术百科全书》的参编者。赫尔德曼先后在密歇根州立大学、密苏里大学、新泽西州立罗格斯大学和俄亥俄州立大学为本科生和研究生开授过食品工程课程。他曾在金宝汤公司、美国食品加工协会，以及温伯格咨询集团公司担任过技术主管。他先后得过多项奖励，例如，1981年获得DFISA-ASAE食品工程奖，1978年获得俄亥俄州立大学杰出校友奖，1974年获得ASAE青年研究学者奖，并

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



且曾经担任过 2006—2007 年度美国食品科学技术协会（IFT）主席。2011 年，他被工程和食品国际协会授予食品工程终身成就奖，并被冷冻食品基金会授予食品冷冻研究奖。2013 年，IFT 和 Phi Tau Sigma 授予赫尔德曼卡尔·R·费勒斯奖。此外，赫尔德曼是 IFT（1981）、美国农业工程师学会（1984）、国际食品科学与技术学会（2006）的成员。

## 第五版序

20世纪90年代初我从化学工程专业毕业并取得学士学位后不久,便见到了由辛格和赫尔德曼教授编写的《食品工程导论》第二版。当时我受聘于一家工程公司从事食品加工厂设计和施工工作,因此需要了解食品工程。有关食品加工单元操作的精彩描述使我能得心应手地投入第一份专业工作。1997年我作为研究生在一次食品工程会议上遇到了辛格和赫尔德曼两位教授,当时他们介绍了起着远距离研究和教育工具作用的远程实验室前沿工作。我在美国佛罗里达大学当助教的第一年,有机会与辛格教授讨论过为食品科学专业学生教授工程原理方面所遇到的问题,这些问题主要是由于当时为这类学生设置的数学课程极少所引起。过去八年里,我所教的柑橘加工技术课程使用了《食品工程导论》的第三版和第五版作为参考书。这是一本专为食品科学家写的书,很难想象,美国的食品科学或食品工程专业人员还有谁未使用过《食品工程导论》作为教材或参考书。本书的早期版本已经被翻译成西班牙语、汉语、韩语、葡萄牙语、马其顿语和阿尔巴尼亚语。我还了解到有位退休工程师为了保持头脑活跃,甚至还时常对该书习题进行解答。

过去十年中,随着婴儿潮年代出生人员的退休,包括本人以及在华盛顿州立大学几位同学在内的多位青年助教,相继在全美主要大学的食品科学系担当食品工程教学任务。本人问到的一些人均反映在有关课程中引用了《食品工程导论》。一些人引用了书中大部分内容,另一些人则引用了几章。《食品工程导论》的第五版出版得非常及时,是教授们应有的一本很好的教学工具书。

食品工程很大程度上涉及对食品加工、包装及贮运过程中发生的动态理化现象加以解释,以便对提供安全、营养和市销的食品的加工过程进行设计和操作。动态过程虽可用数学微分方程描述,但对于缺乏这方面知识的学生来说,是一件很困难的事。幸运的是,《食品工程导论》给出了这些方程的简单代数求解方法,并为学生提供了可以轻松建立并应用的电子表格之类的工具,从而克服了上述困难。头脑精明的学生无需经过烦琐的数学运算,只要利用此类模拟工具便可对相关变量进行深入了解,并观察它们对过程产生的影响。除了前几版本已经丰富的内容和工具以外,新版本提供的嵌入式多媒体工具将改善食品加工操作学习的可视化环境,更适合当今技术娴熟型学生。

辛格和赫尔德曼两位教授应用多种策略解决了食品工程教育方面的各种难点。本教材是不断更新的几十年教学经验的产物。能为辛格和赫尔德曼教授的书写序是我的莫大荣幸。本人相信,许多像我一样的学生或教师,都会将《食品工程导论》视为其职业伴侣。

佛罗里达大学

Jose' I. Reyes De Corcuera

## 第三版序

食品工业是一个总收入次于信息业的大产业。为了满足已经超过六十亿世界人口的增长需求，它以飞快的速度发展。农业相关领域的进展使食物生产率达到了前所未有的水平。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着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、流体流动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至关重要，食品科学教学不仅要对研究生，而且也要对本科生进行工程学科领域拓展的引导。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作点贡献。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作的无私努力。

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

## 译者序

再次将辛格和赫尔德曼两位教授合编的第五版《食品工程导论》翻译成中文，奉献给各位读者，深感荣幸。本人在翻译该书第三版时，就深深地为其内容编写的技巧和风格所打动。本书内容及其编写手法充分体现了两位作者在美国，乃至全球食品工程教学界所享有的盛誉实至名归。

以介绍原理应用作铺垫再展开量化关系式的《食品工程导论》涉及的内容，大部分是我国食品专业主要课程——食品工程原理所包含的内容。当前，国内食品工程原理教材有不少版本，为广大师生在食品工程方面的教学活动提供了较大的选择余地，但中文版的国外优秀教材并不多，目前只有中国轻工业出版的第三版《食品工程导论》中译本。此次翻译的该书第五版，较第三版增加了辅助过程、食品挤压过程和包装概念三章内容，另外，其他一些章节也作了不同程度的调整，增加的内容有第2章的固体食品输送、加工过程控制和传感器，第3章的能源、水和环境，第4章的电导率和欧姆加热，第5章的保藏加工处理系统，以及附录部分的因次分析等，大部分章还增加或更新了习题内容。这些增加的内容，在食品领域具有较大工程应用范围和发展潜力，它为食品工程教材内容注入了新的元素。本人期待此书能对国内食品工程教学和学生掌握食品工程知识有所帮助。

一如既往，感谢中国轻工业出版社提供的此书翻译机会，以及在出版方面所作的努力。感谢本人所在单位江南大学有关师生对本书译事所提供的帮助和启示。

许学勤

2017年5月于无锡



# 前 言

在美国和加拿大,食品工程是取得本科食品科学学位的主要课程。食品加工及工程在IFT批准的规划中被看成核心竞争力之一。这些核心竞争力包括若干工程问题,如(1)工程原理,包括质量和能量衡算、热力学、流体流动及传热和传质;(2)食品保藏原理,包括低温和高温加工、水分活度;(3)食品加工技术原理,如干燥、高压、无菌处理、挤压;(4)包装材料和方法;(5)清洗和消毒。要为数学和工程意识有限的学生介绍这些概念具有很大的困难。我们写本书的目标是为将在食品行业从业的学生提供足够的工程概念背景,以便能和工程专业人员方便地进行沟通交流。

这本书适用于本科食品科学专业的食品工程课程教学。书中的知识点选自食品输送、加工、储存、食品包装和配送过程中的工程应用。大部分主题都包括背景介绍、基本工程概念和实例。采用这种编排方法的目的是帮助学生掌握工程概念的应用,同时对解题方法加以理解,逐步掌握这些概念。

本书范围包括基于基础物理学的基本工程原理和食品加工过程的若干应用。前面四章介绍了质量和能量衡算、热力学、流体流动与传热概念。本书第五版着重增加了一个可持续发展的概念。接下来的四章包括热力学和传热在保藏、冷藏、冷冻和液态食品蒸发浓缩过程中的应用。后面几章介绍与湿空气和传质概念有关的内容,各章涉及的内容包括工程概念用于膜分离过程、干燥过程、挤压、包装和包括过滤、离心和混合在内的辅助过程。

本书第五版包含前四个版本的大部分内容。各章包括了有助于学生对过程应用加以理解的适当描述。虽然方程都从基本概念开始介绍,但这些方程都给出了求解方法和实际应用问题。多数章节包含多个例题,以说明各种概念和应用,一些例题以电子表格程序形式介绍。各章尾的习题内容得到了更新,因而仍能为学生熟练掌握解题技巧提供机会。

本书第五版最显而易见的更新是关于内容载体。除了传统纸质课本以外,本书也有电子书。最后,第三种介绍模式结合了某些适用于平板式电脑的最新交互模式。这些互动手法包括过程动画、有助于“假设”分析的虚拟解题、工业设备照片、加工操作视频片断及模拟实验。模拟实验涉及预测给定过程食品物理、化学或微生物学变化的过程模拟。这些模拟实验以一种用户友好的界面方式展现,目的在于强化学生对重点概念的理解。第五版的第3章重点增加了资源可持续性内容。这些概念可使学生了解描述过程和操作效率的最新术语。

这本书主要适用于为有志取得食品科学研究生学位的本科生开课的教师。用于展示工程概念和应用的一些方法,基于我们自己的综合教学经验。教师们可选择利用本书的章节和有关材料,以满足所教课程的具体目标。书中的描述性信息、概念和例题的组织结构,为教学活动提供了最大灵活性。这本书的信息组织结构确实可以成为学生的学习指南。有些学生经过对给定章节内容的自学,应该可以完成每章后面的较难习题。

本书内容可方便地组织成两步式教学结构内容。第1章到第4章内容可构成第一部

分，信息重点是工程概念。第5章至第8章内容构成强调应用的第二部分。另外，第9章和第10章也可作为基本内容纳入课程，而第11章到第15章也属于应用部分内容。此外，应用部分的章节内容也是加工主干课程的内容基础。

我们要感谢近40年来得到的同事们的许多建议和来自学生的激励。所有意见和建议对于本书不断更新和发展都十分宝贵。正如食品工程概念和应用不断发展一样，我们也将不断与教师和学生保持沟通与交流。

R·P·辛格  
D·R·赫尔德曼

# 目 录

1 引言 .....	1
1.1 量纲 .....	1
1.2 工程单位 .....	1
1.2.1 基本单位 .....	2
1.2.2 导出单位 .....	3
1.2.3 辅助单位 .....	5
1.3 系统 .....	7
1.4 系统状态 .....	9
1.4.1 广延性参数 .....	10
1.4.2 强度性参数 .....	10
1.5 密度 .....	10
1.6 浓度 .....	11
1.7 水分含量 .....	13
1.8 温度 .....	16
1.9 压强 .....	17
1.10 焓 .....	19
1.11 状态方程和理想气体定律 .....	20
1.12 水的相图 .....	21
1.13 质量守恒 .....	22
1.13.1 开口系统的质量守恒 .....	23
1.13.2 闭口系统的质量守恒 .....	24
1.14 物料衡算 .....	24
1.15 热力学 .....	31
1.16 热力学定律 .....	32
1.16.1 热力学第一定律 .....	32
1.16.2 热力学第二定律 .....	33
1.17 能量 .....	33
1.18 能量平衡 .....	34
1.19 闭口系统的能量平衡 .....	34
1.19.1 热量 .....	34
1.19.2 功 .....	35
1.20 开口系统的能量平衡 .....	41
1.20.1 稳定流动系统的能量平衡 .....	41

1.21	总能量平衡 .....	42
1.22	功率 .....	44
1.23	面积 .....	44
	习题 .....	45
	符号 .....	46
	参考文献 .....	47
<b>2</b>	<b>食品加工过程中的流体流动 .....</b>	<b>49</b>
2.1	液体输送系统 .....	49
2.1.1	加工厂的管道 .....	50
2.1.2	泵的类型 .....	52
2.2	液体性质 .....	54
2.2.1	表示材料对应力响应的术语 .....	54
2.2.2	密度 .....	55
2.2.3	黏度 .....	55
2.3	牛顿液体的处理系统 .....	61
2.3.1	连续方程 .....	61
2.3.2	雷诺数 .....	64
2.3.3	过渡区和发展完全的流动 .....	67
2.3.4	发展完全的流动条件下液体流动的速度分布 .....	68
2.3.5	摩擦阻力 .....	72
2.4	管内流动元的力平衡——伯努利方程的导出 .....	75
2.5	流体稳定态流动的能量方程 .....	80
2.5.1	压强能 .....	82
2.5.2	动能 .....	82
2.5.3	位能 .....	82
2.5.4	摩擦能损失 .....	83
2.5.5	泵的功率需要 .....	85
2.6	泵的选择和性能评价 .....	89
2.6.1	离心泵 .....	89
2.6.2	压头 .....	90
2.6.3	泵的操作性能 .....	91
2.6.4	泵的性能曲线 .....	93
2.6.5	汽蚀余量 .....	94
2.6.6	液体输送系统的泵选择 .....	97
2.6.7	相似定律 .....	101
2.7	流量测量 .....	103
2.7.1	毕托管 .....	105



2.7.2	孔板流量计 .....	107
2.7.3	文丘里管 .....	109
2.7.4	可变面积流量计 .....	110
2.7.5	其他测量方法 .....	111
2.8	黏度测量 .....	111
2.8.1	毛细管黏度计 .....	111
2.8.2	旋转黏度计 .....	113
2.8.3	温度对黏度的影响 .....	115
2.9	非牛顿流体的流动特性 .....	117
2.9.1	非牛顿流体的性质 .....	117
2.9.2	指数律流体的速度分布 .....	122
2.9.3	指数律流体的体积流量 .....	123
2.9.4	指数律流体的平均流速 .....	123
2.9.5	指数律流体的摩擦系数和广义雷诺数 .....	123
2.9.6	非牛顿流体的泵输送计算 .....	126
2.10	固体食品的输送 .....	128
2.10.1	粒料和粉末的性质 .....	128
2.10.2	粒状食品的流动 .....	133
2.11	食品加工中的过程控制 .....	135
2.11.1	过程变量和性能指标 .....	136
2.11.2	控制过程的输入和输出信号 .....	137
2.11.3	控制系统设计 .....	138
2.12	传感器 .....	144
2.12.1	温度传感器 .....	144
2.12.2	贮罐液位测量 .....	145
2.12.3	压力传感器 .....	146
2.12.4	流量传感器 .....	146
2.12.5	数据采集的重要术语 .....	147
2.13	传感器的动态响应特性 .....	147
	习题 .....	150
	符号 .....	153
	参考文献 .....	155
3	资源的可持续性 .....	159
3.1	蒸汽的产生 .....	159
3.1.1	蒸汽发生系统 .....	159
3.1.2	相变的热力学 .....	161
3.1.3	蒸汽表 .....	164

3.1.4	蒸汽利用 .....	169
3.2	燃料利用 .....	172
3.2.1	系统 .....	173
3.2.2	质量和能量平衡分析 .....	174
3.2.3	燃烧器效率 .....	174
3.3	电能利用 .....	176
3.3.1	电学术语和单位 .....	176
3.3.2	欧姆定律 .....	178
3.3.3	电路 .....	179
3.3.4	电动机 .....	181
3.3.5	电控制 .....	182
3.3.6	电照明 .....	182
3.4	能源、水和环境 .....	183
3.4.1	生命周期评价 .....	184
3.4.2	食品系统应用 .....	187
3.4.3	可持续发展指标 .....	191
	习题 .....	193
	符号 .....	195
	参考文献 .....	196
<b>4</b>	<b>食品加工过程的传热 .....</b>	<b>199</b>
4.1	食品的加热和冷却系统 .....	199
4.1.1	板式热交换器 .....	200
4.1.2	管式热交换器 .....	203
4.1.3	刮板式热交换器 .....	204
4.1.4	蒸汽注入式热交换器 .....	205
4.1.5	小结 .....	205
4.2	食品的热性质 .....	207
4.2.1	比热容 .....	207
4.2.2	热导率 .....	209
4.2.3	热扩散系数 .....	211
4.3	传热模型 .....	212
4.3.1	传导传热 .....	213
4.3.2	对流传热 .....	215
4.3.3	辐射传热 .....	217
4.4	稳定态传热 .....	218
4.4.1	长方形厚板中的热传导 .....	219
4.4.2	经过管壁的热传导 .....	222

4.4.3	多层系统中的热传导 .....	224
4.4.4	对流传热系数的估计 .....	230
4.4.5	总传热系数的估计 .....	243
4.4.6	传热面的结垢 .....	246
4.4.7	管式热交换器的设计 .....	251
4.4.8	热交换器设计的效能 - NTU 法 .....	257
4.4.9	板式热交换器的设计 .....	261
4.4.10	辐射传热中表面性质的重要性 .....	265
4.4.11	两物体间的辐射传热 .....	267
4.5	非稳定态传热 .....	269
4.5.1	外部热阻与内部热阻对传热的重要性 .....	271
4.5.2	可忽略内部热阻的传热 ( $N_{Bi} < 0.1$ ) ——集总系统的分析 .....	272
4.5.3	有限内部和表面热阻传热 ( $0.1 \leq N_{Bi} \leq 40$ ) .....	276
4.5.4	忽略外部热阻的传热 ( $N_{Bi} > 40$ ) .....	278
4.5.5	有限物体的传热 .....	278
4.5.6	利用温度 - 时间曲线进行传热问题的求解 .....	279
4.5.7	利用 $f_h$ 和 $j_c$ 因子预测过渡态传热的温度 .....	285
4.6	食品的电导率 .....	291
4.7	欧姆加热 .....	293
4.8	微波加热 .....	295
4.8.1	微波加热的机制 .....	295
4.8.2	介电性质 .....	296
4.8.3	微波能热能的转换 .....	296
4.8.4	微波的穿透深度 .....	297
4.8.5	微波炉 .....	298
4.8.6	食品的微波加热 .....	299
	习题 .....	300
	符号 .....	309
	参考文献 .....	312
5	保藏加工 .....	315
5.1	加工系统 .....	315
5.1.1	巴氏杀菌和热烫系统 .....	315
5.1.2	商业无菌系统 .....	317
5.1.3	超高压系统 .....	320
5.1.4	脉冲电场系统 .....	320
5.1.5	其他保藏系统 .....	321
5.2	微生物残存曲线 .....	321

5.3	外部因素影响	325
5.4	热致死时间 $F$	328
5.5	腐败概率	328
5.6	杀菌过程计算的一般方法	329
5.6.1	巴氏杀菌的应用	331
5.6.2	商业灭菌	333
5.6.3	无菌处理与包装	335
5.6.4	联合处理	341
5.7	数学方法	343
5.7.1	蒸煮袋加工	345
	习题	347
	符号	350
	参考文献	351
6	制冷	353
6.1	制冷剂的选择	354
6.2	制冷系统的设备	356
6.2.1	蒸发器	357
6.2.2	压缩机	357
6.2.3	冷凝器	359
6.2.4	膨胀阀	361
6.3	压-焓图	363
6.3.1	压-焓表	365
6.3.2	利用计算机辅助手段确定制冷剂的热力学性质	367
6.4	蒸汽压缩制冷分析中有用的数学表达式	369
6.4.1	冷负荷	369
6.4.2	压缩机	370
6.4.3	冷凝器	370
6.4.4	蒸发器	370
6.4.5	制冷系数	370
6.4.6	制冷剂流量	371
6.5	多级制冷系统	379
6.5.1	闪蒸气体去除系统	379
	习题	382
	符号	383
	参考文献	384
7	食品冷冻	385



7.1	冷冻系统 .....	385
7.1.1	间接接触系统 .....	386
7.1.2	直接接触系统 .....	389
7.2	冷冻食品性质 .....	391
7.2.1	密度 .....	392
7.2.2	热导率 .....	392
7.2.3	焓 .....	393
7.2.4	表观比热容 .....	393
7.2.5	表观热扩散系数 .....	394
7.3	冷冻时间 .....	394
7.3.1	普朗克方程 .....	395
7.3.2	其他冷冻时间预测方法 .....	398
7.3.3	冷冻时间的 $pharm$ 预测法 .....	398
7.3.4	有限大小物体的冷冻时间预测 .....	401
7.3.5	冷冻时间的实验测量 .....	404
7.3.6	影响冷冻时间的因素 .....	405
7.3.7	冷冻速率 .....	405
7.3.8	解冻时间 .....	405
7.4	冷冻食品的贮藏 .....	407
7.4.1	冻藏过程中食品的品质变化 .....	407
	习题 .....	411
	符号 .....	413
	参考文献 .....	414
8	蒸发 .....	417
8.1	沸点升高 .....	418
8.2	蒸发器的类型 .....	420
8.2.1	间歇锅式蒸发器 .....	420
8.2.2	自然循环蒸发器 .....	420
8.2.3	升膜式蒸发器 .....	421
8.2.4	降膜式蒸发器 .....	421
8.2.5	升降膜式蒸发器 .....	422
8.2.6	强制循环蒸发器 .....	422
8.2.7	搅拌薄膜式蒸发器 .....	424
8.3	单效蒸发器的设计 .....	425
8.4	多效蒸发器的设计 .....	429
8.5	蒸汽再压缩系统 .....	434
8.5.1	热再压缩 .....	434