

面向21世纪课程教材



普通高等教育农业部“十二五”规划教材

食品工程原理

第二版

杨同舟 于殿宇 主编

面向 21 世纪课程教材
普通高等教育农业部“十二五”规划教材

食 品 工 程 原 理

Principles of Food Engineering

第二版

杨同舟 于殿宇 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程原理/杨同舟, 于殿宇主编. —2 版. —

北京: 中国农业出版社, 2011. 1

面向 21 世纪课程教材 普通高等教育农业部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-109-15295-3

I. ①食… II. ①杨…②于… III. ①食品工程学—
高等学校—教材 IV. ①TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 249510 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

策划编辑 王芳芳

文字编辑 马颀晨

北京通州皇家印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2001 年 9 月第 1 版 2011 年 2 月第 2 版

2012 年 2 月第 2 版北京第 2 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 28.75

字数: 707 千字

定价: 46.50 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内容简介

食品工程原理是食品科学与工程学科各专业的主要专业基础课之一。本书系统地阐述食品加工和制造过程中的主要工程概念及单元操作原理, 主要内容包括流体流动、流体输送、粉碎与混合、沉降与过滤、传热、蒸发、制冷、干燥、传质、蒸馏、萃取和膜分离等。本书将作为食品工程原理理论基础的动量传递、热量传递和质量传递三大传递理论与对相关单元操作原理的讨论有机结合, 在有限篇幅内提供足够的教学信息量和理论深度, 叙述简明, 深入浅出。本书注意理论联系实际, 配备较大量的例题和习题, 着重培养学生的工程观点及解决工程问题的能力。

本书可作为食品科学与工程等专业的本科生教材, 也适宜作生物工程、制药、环境科学等专业相应课程的教材, 并可供食品、生物工程等行业科研和工程技术人员参考。

第二版编写人员

主 编 杨同舟（东北农业大学、黑龙江东方学院）

于殿宇（东北农业大学）

副主编 陆 宁（安徽农业大学）

参 编（按汉语拼音排序）

金丽梅（黑龙江八一农垦大学）

孟雪雁（山西农业大学）

钱 镭（黑龙江东方学院）

吴苏喜（长沙理工大学）

张伯清（沈阳农业大学）

【第二版】

前 言

本书第一版作为全国高等教育“面向 21 世纪课程教材”于 2001 年由中国农业出版社出版以来,受到全国同行的广泛关注。承蒙诸位同行的抬爱,许多高校选取本书作为食品科学与工程等专业的本科教材及考研参考书。本次再版是作为普通高等教育农业部“十二五”规划教材而出版。

本版仍保持第一版的架构,即将全书按主要传递过程特征分为三大单元。第一单元:第一到四章,可称为动量传递与粒子过程,在阐述流体力学基本原理的基础上,讨论流体输送、粉碎、筛分、混合、沉降、过滤及离心分离等单元操作。第二单元:第五到八章,为热量传递。在阐述传热理论的基础上,讨论热交换、蒸发、制冷、空调及物料干燥等单元操作。第三单元:第九到十二章,为质量传递。在系统阐述传质基本理论基础上,讨论吸收、吸附、离子交换、蒸馏、萃取及膜分离等单元操作。显然,每个单元的首章,即第一、五、九章,是本书的理论核心。

本版在引论中增加了量的单位和量纲一节,使学生一开始就熟悉国家法定计量单位的使用和换算,并为后面讲述量纲分析打下基础。第一章流体流动中,伯努利方程是核心。本章仍从流体静力学的讨论开始,对流体静压能和位能总量衡算。当讨论管内流体流动时,增加了流体第三种机械能——动能,自然引出伯努利方程。对伯努利方程不作严格推导,着重对其意义及应用的讨论。本版对转子流量计原理作了新的阐释,更加合理。第二章流体输送中,对往复压缩机的原理和真空技术的物理基础作了适当简化,突出了真空技术基本方程。第四章沉降与过滤中,将离心分离原理的内容拆分到三种离心机所在的各节中,使离心分离理论密切联系离心机的实际;同时将气溶胶的分离集中设节叙述。本书各单元操作的讨论都是先原理后设备,因此本版第六章蒸发中,将蒸发设备的内容调整到蒸发原理之后。只有了解了蒸汽压缩式制冷,才能理解对制冷剂的要求,因此在第七章制冷中,将制冷剂和载冷剂的内容后移。第八章干燥是本书的重点章之一,为使理论问题不致过于集中,仍采用第一版的方式,将湿空气热力学放在第七章空气调节之前,这既是讨论空调的需要,也为第八章讨论干燥打下基础。干燥既包含热量传递,又包含质量传递,但工程计算主要应用传热,因此仍把该章放在第二单元,它也为后一章讨论传质提供了引子。第九章传质保持了对质量传递原理的系统阐述,但简

化了吸附和离子交换原理。在第十一章萃取中，对逆流浸取级数公式的推导作了更进一步简化。对第十二章膜分离的内容也作了调整，将重点放在反渗透和超滤上。

本版编写者的分工如下。第一章和第四章：陆宁；第二章：金丽梅和杨同舟；第三章：张伯清；第六章：吴苏喜（长沙理工大学易翠平协助）；第七章和第八章：于殿宇；第十章：金丽梅；第十一章：钱镠；第十二章：孟雪雁；引论、第五章和第九章等：杨同舟。钱镠作了索引。统稿工作由杨同舟完成。限于水平，难免会有错误和不当之处，敬请同行及广大读者批评指正。

编 者

2010年6月

【 第一版 】

前

言

《食品工程原理》一书是经教育部高教司批准的全国高等教育“面向 21 世纪课程教材”，是食品科学与工程本科专业的主干课程教材。在低年级学过高等数学、物理学、物理化学、工程制图和机械设计基础等基础课之后，通过本课程系统学习食品加工过程的工程概念和各种单元操作原理，为高年级学习食品机械设备、食品厂设计及各种食品工艺学等课程奠定理论基础。在本专业所有专业基础课和专业课中，食品工程原理是学时最多，而且在教和学两方面都有较大难度的课程，因此，教材问题显得格外重要，急需一部适用教材问世。

十几年前国内出现首本《食品工程原理》教材，对各院校食品相关专业的教学改革起过良好的推动作用。但可能是篇幅的原因，一些院校还是选择非化工专业用的《化工原理》作为食品工程原理课的代用教材。然而化工所侧重的单元操作显然与食品工业不同，因此，许多院校尤其是在食品科技和工程人才的培养方面已占较大比重的全国各农业院校，殷切期望一部适用的有关食品工程原理的教材出版。有鉴于此，中华农业科教基金会把新编《食品工程原理》作为首批高校教材建设项目予以基金资助，经招标确定由我们承担这项编写任务。

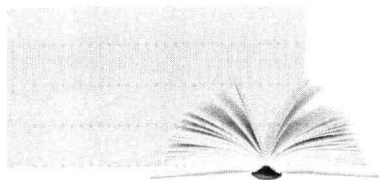
我们尽力将此书编出自己的特色。首先是精于选材。为适应大多数院校为本课程规定的 80~100 学时的教学要求，在有限的篇幅内提供足够的教学信息量并具有一定深度，叙述简明，深入浅出。多着墨于基本概念和基本原理，少描微枝末节。具有食品工程的应用特点，强调制冷、真空技术、物料干燥及均相和非均相物系的分离。新编入了食品冷冻和超临界流体萃取等内容。其次，注意将动量传递、热量传递和质量传递三大传递过程原理与各单元操作相结合，强化了对传质部分的系统描述。再次，编写中重视量和单位的名称、符号的规范化，符合国家法定计量单位的要求。

本书初稿参编人员编写分工为：张家年教授（第一、二、八章），李元瑞教授（第五、六、七章），范贵生副教授（第三、四章），杨同舟教授（引论，第九、十、十一、十二章及附录）。全书由杨同舟教授统稿。本书主审为哈尔滨工业大学蔡伟民教授。书中部分插图的绘制和改绘由刘毅副教授及刘海波完成，谨向他们表示感谢。

尽管在统稿时下了较大功夫，但限于水平，缺点错误在所难免，诚恳欢迎广大读者批评指正。

编 者

2001 年 3 月



目 录

第二版前言

第一版前言

引论	1
0-1 食品工程原理的研究内容	1
0-2 物料衡算和能量衡算	3
0-3 量的单位和量纲	7
习题	10
第一章 流体流动	11
第一节 流体静力学	12
1-1 流体密度和压力	12
1-2 流体静力学基本方程	14
第二节 流体动力学方程	18
1-3 管内流动的连续性方程	18
1-4 伯努利方程	21
第三节 流体流动现象	25
1-5 流体的黏度	25
1-6 流体流动形态	28
1-7 流体在圆管内的速度分布	31
第四节 流体流动的阻力	33
1-8 管内流体流动的直管阻力	34
1-9 管内流体流动的局部阻力	38
第五节 管路计算	41
1-10 简单管路	42
1-11 复杂管路	44
第六节 流量测定	45
1-12 差压流量计	46
1-13 转子流量计	49
习题	50

第二章 流体输送	53
第一节 离心泵	54
2-1 离心泵的结构原理	54
2-2 离心泵的性能	56
2-3 离心泵的安装高度和工作点	58
2-4 离心泵的类型和选用	62
第二节 其他类型的泵	63
2-5 往复泵	63
2-6 旋转泵	66
第三节 风机	68
2-7 通风机和鼓风机	68
第四节 气体压缩	70
2-8 往复压缩机的工作原理	71
2-9 往复压缩机的性能和分类	74
第五节 真空技术	76
2-10 真空技术的物理基础	76
2-11 真空泵	79
习题	81
第三章 粉碎与混合	83
第一节 粉碎	83
3-1 粉碎的基本概念和原理	83
3-2 粉碎设备	87
第二节 筛分	91
3-3 筛分和筛析	91
3-4 筛分设备	95
第三节 混合	97
3-5 混合的基本理论	98
3-6 液体的搅拌混合	101
3-7 乳化	104
3-8 浆体的混合及塑性固体的捏合	108
3-9 固体的混合	109
习题	111
第四章 沉降与过滤	112
第一节 重力沉降	113
4-1 颗粒在流体中的运动	113
4-2 重力沉降设备	117
第二节 过滤	120

4-3 过滤的基本概念	120
4-4 过滤的基本理论	123
4-5 过滤设备	127
第三节 离心分离	133
4-6 沉降式离心机	134
4-7 过滤式离心机	136
4-8 分离式离心机	141
第四节 气溶胶的分离	144
4-9 旋风分离	145
4-10 气溶胶的其他分离方法	147
习题	151
第五章 传热	153
第一节 传热概述	154
5-1 传热的基本概念	154
第二节 热传导	156
5-2 傅里叶定律	156
5-3 通过平壁的稳态导热	158
5-4 通过圆筒壁的稳态导热	159
第三节 对流传热	161
5-5 对流传热的基本原理	162
5-6 无相变的对流传热	164
5-7 有相变的对流传热	169
5-8 流化床中的传热	170
第四节 热交换	173
5-9 换热器	173
5-10 稳态换热计算	179
5-11 非稳态换热	184
第五节 辐射传热	189
5-12 辐射的基本概念和定律	189
5-13 两固体间的辐射换热	192
5-14 微波加热	194
习题	197
第六章 蒸发	200
第一节 蒸发概述	200
6-1 食品物料的蒸发	200
6-2 蒸发的操作方法	202
第二节 单效蒸发	204
6-3 蒸发的传热温差	204

6-4 单效蒸发的计算	206
第三节 多效蒸发	208
6-5 多效蒸发方法和节能	208
6-6 多效蒸发的计算	210
第四节 蒸发设备	212
6-7 蒸发器	212
6-8 蒸发辅助设备	216
习题	218
第七章 制冷	220
第一节 制冷技术的理论基础	220
7-1 制冷的基本原理	220
7-2 一般制冷方法	222
第二节 蒸汽压缩式制冷	225
7-3 蒸汽压缩式制冷循环	225
7-4 蒸汽压缩式制冷的计算	228
7-5 制冷剂 and 载冷剂	231
7-6 蒸汽压缩式制冷设备和系统	233
第三节 食品冷冻	238
7-7 食品冷冻的理论基础	238
7-8 食品冷冻设备	241
第四节 湿空气热力学	243
7-9 湿空气的性质	243
7-10 湿空气的基本热力学过程	249
第五节 空气调节	252
7-11 直流式空气调节	252
7-12 回风式空气调节	253
习题	255
第八章 干燥	257
第一节 干燥的基本原理	257
8-1 干燥的目的和方法	257
8-2 湿物料中的水分	259
8-3 干燥静力学	263
8-4 干燥动力学	269
第二节 干燥设备	274
8-5 对流干燥设备	275
8-6 其他干燥设备	277
第三节 喷雾干燥	279
8-7 喷雾干燥原理及应用	279

8-8 喷雾干燥设备	283
第四节 冷冻干燥	286
8-9 冷冻干燥原理	287
8-10 冷冻干燥装置	290
习题	292
第九章 传质	294
第一节 质量传递原理	295
9-1 传质概述	295
9-2 分子扩散	296
9-3 对流传质	299
9-4 相间传质	304
第二节 吸收	308
9-5 吸收平衡和吸收速率	308
9-6 吸收塔的计算	311
9-7 填料塔的结构和性能	315
第三节 吸附	320
9-8 吸附的基本原理	321
9-9 吸附分离过程与设备	324
第四节 离子交换	331
9-10 离子交换的基本原理	331
9-11 离子交换过程与设备	337
习题	342
第十章 蒸馏	344
第一节 蒸馏的基本原理	345
10-1 双组分体系汽液相平衡	345
10-2 蒸馏方法	347
第二节 双组分精馏的计算	352
10-3 精馏塔的物料衡算	352
10-4 进料状态对精馏的影响	355
10-5 平衡级数的确定	357
10-6 回流比的影响和选择	359
第三节 精馏装置及节能	362
10-7 板式塔的结构和性能	362
10-8 精馏装置的节能	368
习题	370
第十一章 萃取	372
第一节 液-液萃取	372

11-1 液-液萃取的基本原理	372
11-2 液-液萃取过程	376
第二节 浸取	381
11-3 浸取的基本原理	382
11-4 浸取流程和设备	385
11-5 多级逆流浸取级数的计算	388
第三节 超临界流体萃取	393
11-6 超临界流体萃取的基本原理	393
11-7 超临界流体萃取在食品工业中的应用	397
习题	400
第十二章 膜分离	402
第一节 膜分离概述	402
12-1 膜分离过程的分类与特性	402
12-2 膜的分类和性能	404
第二节 常用膜技术	406
12-3 反渗透	406
12-4 超滤	410
12-5 反渗透和超滤装置及流程	412
12-6 电渗析	416
12-7 膜分离技术在食品工业中的应用	420
习题	425
附录	426
1. 单位换算系数	426
2. 干空气的物理性质 ($p=101.3\text{kPa}$)	427
3. 水的物理性质	428
4. 饱和水蒸气表	428
5. 常用固体材料的物理性质	431
6. 食品的冷冻性质	432
7. 管子规格	433
索引	435
主要参考文献	442

引 论

Introduction

0-1 食品工程原理的研究内容	1	0.2B 能量衡算	5
0.1A 单元操作	1	0-3 量的单位和量纲	7
0.1B 三大传递过程	2	0.3A 法定计量单位	7
0.1C 食工原理与化工原理的密切关系	2	0.3B 单位换算	9
0-2 物料衡算和能量衡算	3	0.3C 量纲	9
0.2A 物料衡算	4	习题	10

0-1 食品工程原理的研究内容

食品工程原理课程讲授食品加工和制造过程的各种工程概念和单元操作。

本课涉及的工程概念很多，如：区分流体流动形态的概念——层流、湍流；表示传热方式的概念——热传导、热对流、热辐射；分析传质难度和装置效能的概念——传质单元数、传质单元高度；等等。对于各种工程概念，将在各章讨论不同的传递过程和单元操作时依次学习。

现在让我们首先了解什么是单元操作。

0.1A 单元操作

各种现代食品的工业生产，都有其独特的加工工艺。每种工艺都是由一系列基本步骤构成的。例如，由甜菜制糖要经过三十多个步骤。其中主要步骤为：甜菜经过清洗，用切丝机切丝。以一定温度的水进行浸取，使糖溶解。再经一系列步骤将杂质分离出去。糖溶液打入蒸发罐蒸发浓缩，再入结晶罐结晶。将晶糊用离心机分离出糖结晶，经干燥即可得糖制品，包装入库。其中浸取、蒸发浓缩、结晶、离心分离、干燥等都是主要的基本操作步骤。再如由大豆以萃取法制油，先经过大豆筛选、粉碎、去皮、压片，然后以正己烷浸取，浸取液经过滤、蒸发脱溶剂和离心脱胶等步骤，得豆油产品。可见，虽然甜菜制糖和大豆制油的生产工艺是不同的，但是，两者的有些操作步骤是类似的。例如，以水浸甜菜丝和以正己烷浸豆片，都是用溶剂把固体中的一些成分萃取出来，二者遵循相同的传质规律。我们将这种基本生产步骤称作浸取。浸取就是一些食品加工工艺共有的一种基本步骤，称作一种单元操作(unit operation)。再如，制糖中结晶前的糖液浓缩和制油中油浸取液脱除正己烷，都采用同一种单元操作——蒸发。蒸发是通过供热使溶液中易挥发的溶剂汽化分出，两种工艺中的蒸发单元操作遵循相同的传热规律。

同一种单元操作，具有共同的理论基础，它遵循相同的平衡和动力学等规律，应用一些典型设备予以实现，有相同的工程计算方法。食品工程原理课讨论近二十种单元操作。将这些单元操作的基本原理、典型设备和工程计算方法搞清，对数以千计的具体食品加工工艺就

不难掌握。有人把单元操作比喻成语言中的字母，二十几个字母可组合成各种词汇和优美的文句。掌握了单元操作，各种食品生产过程不过是单元操作的连接和组合，只是不同食品工艺，这些单元操作的具体条件有异而已，单元操作的规律性是共同的。对这些单元操作本身进行深入的理论探讨，透彻了解其一般性和本质性规律，对了解和设计各种食品加工工艺是很有意义的。例如，分析由牛奶制造奶粉的工艺流程，可知它主要由流体输送—离心沉降（净乳）—混合（成分标准化）—热交换（杀菌等）—蒸发（浓缩）—喷雾干燥等单元操作构成。其中的蒸发操作，在操作温度、压力等条件上可能与制糖、制油等工艺中的蒸发不同，但其操作原理和规律性却是共通的。

食品工程原理研究食品工程中应用的各单元操作的基本原理和方法、典型设备和相关计算，构成食品工程学的理论基础。

0.1B 三大传递过程

食品工程原理是以三大传递过程原理作为理论基础的，三大传递过程为：动量传递、热量传递、质量传递。

1. 动量传递（momentum transfer）食品工程中常见到运动的流体发生的动量由一处向另一处传递的过程，这就是工程流体力学研究的内容。影响流体流动最重要的一种流体性质是它的黏度。从微观角度看，流体分子由于热运动不断进行动量传递和交换，是产生黏度的主要原因。主要以流体动量传递原理作理论基础的单元操作有：流体输送、混合、沉降、过滤、离心分离、气力输送等。

2. 热量传递（heat transfer）因温度差的存在而使能量由一处传到另一处的过程即为热量传递。包含热量传递原理的单元操作主要有：热交换（加热或冷却）、蒸发、物料干燥、蒸馏等。

3. 质量传递（mass transfer）因浓度差而产生的扩散作用形成相内和相间的物质传递过程，称为质量传递。主要遵循质量传递原理的单元操作有：吸附、吸收、浸取、液-液萃取、蒸馏、结晶、膜分离等。

一种单元操作往往涉及不止一种传递过程，例如蒸馏操作既涉及质量传递，也离不开热量传递。现代食品工业常常涉及复杂的分离过程，以制造高价值的食品配料，去除天然食品原料中无益或有害的成分，或者回收食品加工副产物中有用的成分。前面列出的各单元操作，大部分是物质分离过程。因此，要掌握现代食品工程技术，必须学好作为各种单元操作理论基础的三大传递过程原理。

本书依次介绍流体流动、传热和传质等三大传递的基本原理，在此基础上讨论相关的单元操作。要从理论上分析和阐明各种单元操作原理，首先必须学好三大传递的知识。在以后的学习中会发现，三种传递过程尽管不同，但却有许多概念和规律存在相似之处。

0.1C 食工原理与化工原理的密切关系

在历史上，食品加工远远早于化学加工。但许多世纪以来，食品加工长期停留在家庭烹调和手工作坊操作水平上，以代代相传的加工经验和传统方法为其生产方式的基础，迟迟没有形成食品科学或食品工程学科。

化学工业的产生是近代的事情。化学工业虽然产生较晚，但因为其起点的科学知识水平较高，因而发展较快。尤其在 20 世纪 20 年代，由于汽车工业和航空工业等对优质燃料和材料的迫切需求，促使石油化学工业突飞猛进发展。生产的飞速发展迫切要求对生产过程规律性的研究和理论上的总结提高，使化学工程学科得到飞快发展。人们从长期化工生产实践

中,把不同化学生产工艺过程所共有的基本操作步骤抽提出来,研究其各自的内在规律性,在理论上加以总结,再到生产实践中应用和验证,不断提高,就产生了单元操作的概念。

单元操作概念的抽提是了不起的事情。这些概念不仅使人们认识了这些操作的共性,统一了原来认为各不相干的化工生产技术,而且随着对每种单元操作内在规律和基本原理系统而深入的研究,更强有力地促进化工生产技术的发展。所有这些单元操作研究成果的综合,就构成了化学工程的基础学科——化学工程原理。

食品工业在第二次世界大战期间及战后得到飞速发展。人们发现食品工业中许多基本操作步骤在原理上与化工是相似的,将化工原理中现成的单元操作研究成果应用于食品工程,就产生了食品工程的基础理论——食品工程原理。可见,食工原理的基本内容来源于化工原理,二者对单元操作的研究是相通的。各种化工原理的书籍自然就是本课程的参考书。

然而,由于食品加工物料的特殊性,使食工原理不是仅仅重复化工原理的东西,它在发展中形成了自己的许多特色。

首先,食品物料都是热敏性的。食品加工的原料都是动植物产品,其主要成分中:蛋白质遇热容易变性,其中的各种酶遇热会失去活性;脂肪成分在较高温度易氧化变质;碳水化合物遇热易于发生褐变;维生素多具热不稳定性;风味性的芳香成分遇热易挥发损失。为避免热敏性成分被破坏,食品加工就不得不采用较低温度。低温常常与低压密切相关,所以在食品工程中,非常注重真空技术的应用。对真空蒸发、真空过滤、真空干燥、真空蒸馏、冷冻升华干燥等的理论研究和应用技术比化工更为重视。

其次,食品原料与制品具有易腐性。食品原料和制品含有各种人类需要的营养成分,因而也是微生物活动繁衍的好场所。正是在这些微生物及其所含的酶的作用下,食品才发生腐败变质的。食品加工的主要目的之一就是抑制微生物的活动和酶的作用而提高食品的保藏性。因此在食品加工工程中,浓缩、干燥和冷冻等操作的地位特别重要。在食品加工中,不断开发出新的浓缩、干燥和冷冻技术,这三种单元操作的研究应用在食品工业中已比在化学工业中发展迅速。

再次,食品加工的原料几乎都是凝聚态的。而许多化工生产是以甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等气体为原料的。这就使二者对各种单元操作的应用有不同的侧重。在化学工业中,吸收、蒸馏操作占有突出地位。而在食品工业中,浸取、过滤、离心分离以及混合、乳化、粉碎等单元操作就格外受到重视。新的提取和分离技术,如膜分离、凝胶过滤、酶萃取等,在食品研究和应用领域发展很快。

由上可见,食品工程原理在创立阶段,从化工原理引进和借鉴了许多概念和观念,受益多多。在后来的发展中,由于学科的综合、分化和相互渗透,更由于食品工业已发展成为许多国家的支柱产业,生产实践为学科发展提供了大量素材,食品工程原理已经发展成为内容丰富、独具特色的学科,成为食品科学学科体系的重要组成部分。可以说,现在食品工程原理和化工原理是联系密切、各具特色、并行发展的学科。

0-2 物料衡算和能量衡算

食品工程原理中讨论每种单元操作的基本原理时,都包括过程的平衡关系和过程的速率两个方面。

过程的速率正比于过程的推动力,反比于过程的阻力: