

丁霄霖 宋正良 周清渝

农产品 加工工程

[美] S. M. 亨德森 著
R. L. 佩里



农业出版社

农产品加工工程

[美] S. M. 亨德森 著
R. L. 佩里

丁霄霖 宋正良 周清澈 译
刘树楷 校

农业出版社

农产品加工工程

〔美〕 S. M. 亨德森 著
R. L. 佩里

丁霄霖 宋正良 周清澈 译
刘树楷 校

农业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 14 印张 1 插页 388 千字
1984 年 2 月第 1 版 1984 年 2 月北京第 1 次印刷
印数 1—3,250 册

统一书号 16144·2669 定价 2.70 元

译 本 序 言

近年来随着农业生产规模的日益扩大和农产品产量的不断提高，促进了农产品加工工业的迅速发展。由于农产品的种类繁多，对加工的要求也是多方面的，例如：

原料的清理、筛选、磨碎和分级；

原料的运输和保藏（包括脱水、杀菌和灭虫）；

食品（包括谷类、肉禽、蛋乳、烟酒、糖品、果蔬等等）的制备和保藏（冷藏干藏和罐藏等）；

饲料的制备和保藏。

这就必须应用许多机械操作和化工单元作为处理和分离的手段。此外在加工生产中还要用到仪表计量（包括温湿度、压力、流量和液面的测量与控制等），以及企业经济管理和工厂车间设计等等的知识。所包括的内容比较广泛，所需要的理论基础也是多方面的。《农产品加工工程》(Agricultural Process Engineering)就是力图把这些项目都包括进去的一门综合性学科。是国外农业工程、农学以及食品工业系学生必须选读的课程之一。

本书是美国加利福尼亚大学农业工程教授S.M.Henderson和R.L.Perry二人合编的一本教材，为美国一些农业工程和食品工业系科所采用。他们于1954年写成，并先后在1966年和1976年修订过两次。本书是按照1976年新版本译出的。如果把1954年的初版本同1976年的新版本比较一下，可以看出虽然二者都分为16章，次序也未变更，但新版的篇幅却增加了十分之一。增加内容有：非牛顿型流体，流化床技术，气流输送，离心泵的基本理论，风机的性能及并串联操作，筛分机理，物料在输送带上的运动分析，以及同干燥有关的湿球理论和降速阶段机理等等。这说明在美国，随着

农产品加工工业的发展，有关专业学生在理论上需要不断扩大与加强。

本书不但是农产品加工工程方面的一本较为全面的教科书，也是食品工业方面值得一读的参考书。

参加中译的有华北平原农业项目办公室周清澈农艺师，中国农业机械出版社宋正良工程师和无锡轻工业学院丁霄霖副教授。最后由本人校阅。

在审校和整理过程中，得到无锡轻工业学院谷文英、韩继先、盛炳乾三同志的帮助，特此致谢。

刘树楷

1981年10月于无锡轻工业学院食品工程系

初 版 序 言

农业加工的含义是：在农村或可以在农村进行的一切加工活动，也就是可使农民获得现实收益的地方企业所进行的一切加工活动。更确切地说，凡保持或提高农产品的品质或改变其形状或特性的一切农村或地方的活动都可以视为农业加工。农业加工活动的任务是通过提高成品的数量，产品的种类，或通过二者而从农产品原料中获得较高的产量，并通过提高农产品的质量或产量或降低生产成本以改善产品的纯经济价值。

所谓农业加工活动主要是：

谷物、种子、坚果、棉花、水果、蔬菜、花生、蛋类等的清选、分类、分级和处理。

谷物、种子、饲料、坚果、烟草、水果、蔬菜、牛奶、酒花、蛋类等的干燥或脱水。

家畜饲料、化肥的粉碎与混合。

高粱、甘蔗、稻米的加工。

水果、蔬菜的装罐。

水果、蔬菜的包装。

家畜、家禽的屠宰。

水果、蔬菜、肉类的冷冻。

农产品的贮藏和运输。

还有有关牛奶、牛油、干酪、冰淇淋、蜂蜜、糖蜜、薄荷、松脂、纤维作物的加工等。

加工作业包括一系列的工序或“单元操作”。许多“单元操作”都不仅适用于一种加工作业，例如，物料的输送，清选与分类，干燥等。在一般农业工程课程中论述不够充分的许多设备或方法，例

如各种风机、热量传递、检测仪表、工序简化等，在农业加换中却是很重要的。在农业加工中对我们来说显得最为重要的单元操作、加工工艺、设备与方法是：

原料的粉碎
清选与分类
干燥与脱水
蒸发浓缩
冷冻
混合
物料输送
空调
蒸汽的产生与利用
传热
泵与风机
工厂设计
工序简化
检测仪表

本教材主要是供农业工程高年级学生在学习农业加工工程基础时参考。我们设想：学生已经学完了微积分、热力学、也许还有热动力工程等课程。虽然多数学生已经学完了流体力学中的一些内容，我们还是设置了一章“流体力学”，用作研究、复习问题时的参考，并为“流体流动测量”一章提供理论基础，以及作为有关流体通过多孔介质的资料来源。同样，不少学生已经学会了处理有关农业成本的经济学，我们还是编入一章有关成本的分析。我们相信，该章所阐明的作业成本的分析方法，对于一位工程师来说将是很有价值的。本教材尽可能根据基本理论来编写。可惜，某些章节还没有充分发展，处理尚欠严谨（例如，清选与分类，工厂设计等）。而对另一些章节却作了详尽的描述，因为我们感到农业工程师总是对应用比设计更感兴趣。

我们建议教师把本地区加工业中常见的各种单元操作增添到教

材中去,这样可以使他的学生能适应更多的工作,这比按某一企业为基础来讲授要好些。建议广泛利用参考资料及公认的工程手册。所设的练习题可将本地区典型的及学生们感兴趣的问题补充进去。本书的附录可以作为解答问题的参考,也可以作为实习工程师的参考资料之用。

在本书的编写过程中,工业部门、大学、以及在政府中工作的、曾给予我们许多帮助的人们,我们由衷地向他们表示感谢。由于篇幅有限,不能列出曾给予某些重要帮助者的全部名单。我们谨对下列诸位所作的重大贡献表示谢意:加利福尼亚州大学R. M. Barnes 博士;衣阿华州立大学 J. C. Hempstead 教授;密执安大学 R. G. Folson 博士; A. T. Farrell 公司的 Ronald Banton; Hart Carter 公司的 Hill Shepardson; Westinghouse 公司的 A. J. Boney; Rockwell 制造公司匹兹堡仪表分部的 Gilbert T. Bowman; Link-Belt 公司的 Frank Maytham; Minneapolis-Honeywell 调节器公司的 E. C. Meyer; Clevite Brush 研究公司的 Waldo H. Kliever。

我们特别感谢福格逊基金会给予物质上的支持,使本书的编写得以完成;并感谢代表基金会的 Harold E. Pinches 先生,给予鼓励与提供意见。我们更特别感谢加利福尼亚大学(戴维斯)在本书的设计安排上给予合作并提供大量的材料设备。

S. M. 亨德森

R. L. 佩里

1954年12月

再 版 序 言

本书自初版以来有关农业加工工程方面的基本原理与实际应用已经有了不少的发展。本版根据主要对象尽可能将这些资料收编进去，以便使本书的用途尽可能广一些。增补了新近有关的参考文献并增加了一些练习题。

我们还是建议教师将学生所在地区常见的单元操作收编到教材中去。我们极力推荐广泛利用本书及其他来源的参考资料。书内的练习题是按不同难易程度安排的，建议广为利用。当然，教师根据当地的需要与对象所安排的习题都应加以利用。

S. M. 亨德森

R. L. 佩里

1966年6月

三 版 序 言

本书自 1966 年再版以来,农业加工工程科学已经有了许多发展与改进。为了反映这些变化,参考文献作了修改。文中作了一些变动以改善本书的实用性,但书的理论基础未作大的变动,因而全书的大纲保持不变。

近十年来食品工程已经成为农业工程不可分割的且更为重要的领域。事实上,初版序言就已经阐述了食品工程的领域,并提出了工程师在此领域内有效地进行工作所应具有先进才能的一个提纲。作者相信:本书可以在新兴的食品工程领域内以及在更广泛的农业加工工程领域中得到应用。

为了方便起见,工程技术应实行公制。在附录中已经增加了这部分内容,以便换算。

S. M. 亨德森

R. L. 佩里

1976 年 4 月

目 录

译本序言	
初版序言	
再版序言	
三版序言	
第一章 工程引论	1
第二章 流体力学	8
第三章 流体流动的测定	44
第四章 泵	80
第五章 风机	104
第六章 粉碎	126
第七章 清理与分级	157
第八章 物料搬运	196
第九章 传热	236
第十章 空气-蒸汽混合物(湿度图)	282
第十一章 干燥	303
第十二章 制冷	340
第十三章 操作条件的检测、记录和控制	367
第十四章 成本分析	390
第十五章 工艺分析与厂房设计	407
第十六章 手工操作的技术经济	419
附录 1 单位换算关系	428
附录 2 英制与公制的换算	428
附录 3 容重	429
附录 4 美制筛号(部分)	430

附录 5 燃料热值与每加仑的重量431

附录 6 不同物料的平均比热431

附录 7 管件尺寸433

附录 8 蒸汽表435

附录 9 不同海拔大气压的查对436

第一章 工程引论

工程的定义是“为了人类的利益而利用自然力和天然物，并指导人类根据此目的进行活动的技术与科学”。

上述定义的含义将工程划分为两类活动：(1)技术与(2)科学。工程是以纯科学，物理学，化学，数学为基础的，其在一定条件下，无论何时或何地存在这些条件则产生相同的结果。融化一磅冰所需的能量；在标准条件下的音速；燃烧一磅酒精所需要的空气量及由此所产生的热量；若弹簧数据为已知，对某一弹簧压缩 0.376 英寸所需的力；若孔口常数已知，倒空某一水箱所需要的时间；以及不管数据的来源或外界条件如何，7068 与 386 相乘之积是可以再现的。

然而，我们刚开始对自然物与自然环境应用标准值时，我们即注意到了结果中的变化，这可能与时间、地点，或其它条件有关。上述弹簧经使用几个月之后，由于弹性疲乏，测试时可能不止压缩 0.376 英寸。每磅商品酒精所产生的热量可能是 12950 英国热量单位 (Btu) 而不是预想的 13170 英国热量单位。上述孔口常数可通过已发表的图表找到，但其数值要精确地代表设想中特定的孔口却是不大可能的。这样一来，在多数工程计算中，结果是不精确的。在一般计算中，允许有 2% 的误差。

许多工程计算在概念上是理论的，但在实用上却是经验的。因为一个或几个重要的系数必须通过实验来测定。例如，农产品的干燥速率可用下式表示：

$$dq/dt = kp_s (p_m - p_a)$$

k 项，可能被称为常数，但实际上并不是，因为对每一物料都必须经过实验测定。结合水分与自由水分之间有个分界点，超过某一定含

水量时就不能应用。但由于在这二者之间会有“跳跃”，并不存在精确的分界点。况且，由于农产品栽培的气候与土壤条件、品种、收获与开始干燥之间的时间，等等，该数值将有所不同。 p_m 为该物料的蒸汽压，是由事先经过观察测定的平衡水分曲线中得来的，该数值如同所谓常数 k 一样，或多或少，易受同样的变化。虽然空气中水分的蒸汽压 p_a 与饱和压力 p_s 也都是经验的，但数值却是可靠的。

在负荷下某一木制构件的性能可根据某些合理的公式加以计算，得出外部纤维的张力，该构件的最大横向剪应力，以及弯曲量等。然而，这些计算需要某些“常数”来决定其性能极限，如极限强度、弹性限度、以及弹性模量等。这些常数是变化可能很大的大量个别观测值的平均数。因此，任何单个构件都可能比平均数弱得多。合理的计算应采用2至6的安全系数以保证符合要求的性能。

某些工程关系即使关系的基础还不清楚或不明显也可用图表或数学来表示。此类关系系全部根据试验数据，完全是经验性的。例如，碾磨谷物动力与颗粒大小之间的关系，粘度与温度变化之间的关系，干燥仓对气流的阻力，以及离心泵压力与排量之间的关系等。

工程科学指的是该领域正确与合理的方面。因为是正确的，所以用于任何一组条件其结果总是相同的。这些条件可用数学表示其关系，并根据定律在纯科学的基础上可使其合理化。必须经过实验测定的任何常数或变数均可给其下定义，而且既成立之后变差就不是很大。

工程技术指的是判断、估计与处理工程不定因素使之合理解决某一问题的能力。它是通过一系列的反复试验与不断摸索，使之尽可能按合理的程序以求得所希望的结果，而并不一定涉及对基本原理的探索。它是以有效的方式来运用经验。例如，古代中国人炼钢铁与埃及人制玻璃；虽然那时中国人对冶金学一无所知，埃及人也不懂得制玻璃的科学。印第安人用死鱼给他们的玉米施肥，但他们却一点不懂植物与土壤科学。波特兰 (Portland) 水泥与石油产品发展得很好，但对二者的化学却完全不懂。农作物干燥机设计的性能很好，但除了全面情况以外，对物料的干燥特性却懂得很少。

农产品加工领域所含的不定因素比一般的工程领域要多。成功地处理某一问题往往要求工程师估计、推断，或凭经验积累的知识去解决问题。偶尔，必须根据直观的判断作出决定。这种方法是很危险的，但有时却是必要的。

就是这种能力，鉴定不定因素的能力，把一个工程师与一位纯科学家区分开来，工程师的成功在很大程度上取决其处理这些不定因素的技巧。

不定因素的鉴定

并没有估量不定因素的明确规则与方法。如果有，也就不成其为不定因素了。然而，可以提出以下少许有所帮助的方法、因素、及原理：

理想环境 在设计、发展或研究一项工程问题（或方案）时，最好是通过众所周知的事实以及与之有关（或似乎明显有关）的方法来加以估量。如果根据已知的规则、因素、与定律，该项问题是十分理想化的，则其可以作为工程最后定案的一个标准或适宜的尺度。

例如，一吨谷物从 24% 的含水量降到 14% 所需要的热量必须精确地加以测定或估计。在含水量的降减中，必须去水 234 磅。但目前还没有现成的数据可用以表示实现此种降减所需要的精确的热量。然而，如果水以蒸发的方式去掉，则约需 234000 英国热量单位 (Btu)。这可被认为是理想化的了。我们知道，多数现存的水分都正是液体状态的。所以，需要的热量可能小于上述数字。但在另一方面，每粒谷物中心的水分都必须从中心移动到表面，这个过程则需要额外的能量。在缺乏明确数据的情况下，我们假定水分从中心移动到表面所需要的能量等于降减非液态水分所需要的能量。这样，我们所设想的汽化热数据是可用的。

变差 工程技术人员之所以需要安全系数有两个原因：（1）基础知识不充分或不完善及（或）（2）不能预见未来的操作条件。产品、

气候、市场、需求等等的变化，其影响某一问题的许多工程情况是难以甚至有时是不可能估量的。

统计方法的知识将有助于对许多包含变数或不定因素的问题得出满意的答案。这特别是对从事研究试图确立基本关系的人是很有帮助的。

统计学，特别是分析统计学，可定义为“变因的数理学”。抓住这些方法可用以 (a) 易于了解的图解形式表示一大堆数据，(b) 将该数据分解成一个数学公式，或 (c) 确定其可靠性。可靠性的统计学评定是非常重要的，因为这有助于确定数据的定性值，某些事件的可能性，以及必须用以得出重要结果的样品数量与特性。要在少量简短的章节里给读者一点可用的统计学知识是不可能的，但可通过下列激发其兴趣。

一个有 20 名学生的班分成两个由不同讲师讲课的 10 人小组。两组的最后考分如下表。

A组	B组
78	82
90	76
60	81
77	97
84	84
87	99
89	73
96	78
72	86
54	87
平均78.7	平均84.3

A组的讲师由于教的不好挨批评了，因为 (1) 全班平均低于B组，(2) A组最差学生的考分低于B组的最差学生，(3) A组的最好学生的考分低于B组的最好学生。

然而，统计分析却表现如下：标准差，这是变差的尺度，发现

A组为 8.4 而 B 组为 8.5。这个发现表明，由抽样所代表的全部可能的考分的三分之二都处在由平均数 加减标准差 所限定的范围之内。这个范围 A 组是 70.3—87.1 而 B 组是 75.8—92.8。注意两组的总幅度为 70.3—92.8，75.8—87.1，即整个幅度的 50% 两组是共同的。这表明，某一个组的考分系一种机会随机化的可能而不是教的不好的结果。经过一项重要的标准统计测定应用并合标准差 (8.5 与平均值之差 5.6) 表明，小组差的 20 个机会只有一个是由于教的不好。平均值之差必须超过 6，统计学家才认为统计结果是教课能力之间的差异的作用。

这个简单的例子以一种基本的方式表明若采用的数据系表面值所出现的困难，工程师应分析由一系列观察值所得平均数的某一数字的真正价值。得出平均数的各观察值中的变差是什么？该变差是否系由于采样方法造成的？这些观察值的可比性如何？各观察值之间不一致的原因是什么？最后，该平均数的准确性或代表性如何？前面所说的标准差系变差或精确度的指数。目前已有类似的指数用以处理一系列的可比平均数，用以评定某一曲线对制图数据或曲线数据，等等的拟合。

值得注意的是在正常分布的样品中的一个有用的近似关系，

$$(\text{平均数的幅度}) = (\text{样品幅度}) / \sqrt{\text{样品数}}$$

例如，五份采自某一田间的谷物样品含水量的百分数分别为 11, 17, 15, 15, 13，平均数为 14.2%。平均数范围或真实平均数可能存在的范围是

$$(17 - 11) / \sqrt{5}$$

即 2.68。如果以上 5 份样品是真实随机样品，则概率近似 2:3，真实平均值处于 $14.2 \pm 2.68/2$ ，即 12.9—15.5% 之间。

这个统计上的讨论并不是想要给读者提供各种不同情况精确计算的工具，而是想引起兴趣与注意，并指明如果处理恰当，变化很大的因素可以得出有限的结果。

误差 观测误差或误差数对某一计算终点的作用，通过以下方法是易于研究而且是很有趣味的。由两个或两个以上变量所组成的