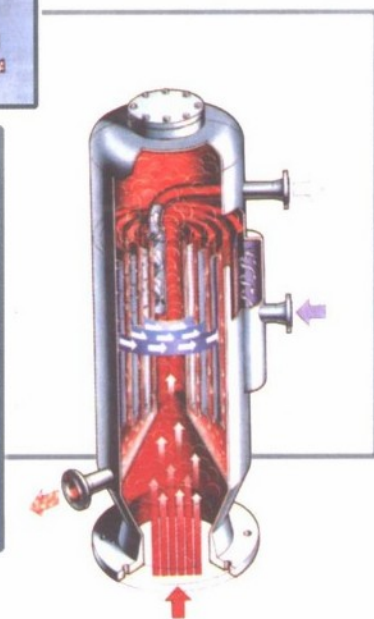
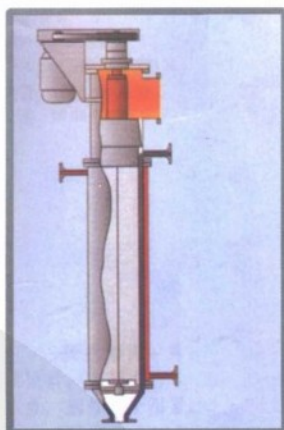
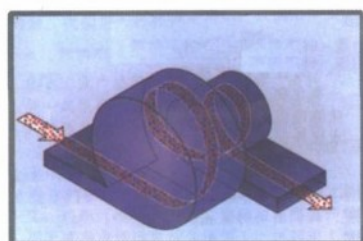


· 高等学校轻工专业教材 ·

食品工程原理

主 编 高福成 · 副主编 冯 马



新华书店

PDG

 中国轻工业出版社

高等学校轻工专业教材

食品工程原理

主 编 高福成

副主编 冯 磊

中国轻工业出版社

轻工出版社

轻工出版社

PDG

图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程原理/高福成主编. —北京: 中国轻工业出版社, 1998.12

高等学校轻工专业教材

ISBN 7-5019-2300-0

I. 食… II. 高… 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 (98) 第 36932 号

责任编辑: 熊慧珊

责任终审: 滕炎福 封面设计: 崔 云

版式设计: 智苏亚 责任校对: 郎静瀛 责任监印: 胡 兵

*

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: 中国人民警官大学印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 45

字 数: 1030 千字 印数: 1~4000

书 号: ISBN 7-5019-2300-0/TS·1419 定价: 68.00 元

• 如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换 •

PDG

序

1985年出版的《食品工程原理》(分上、下册)是经前中国轻工业部食品专业教材编审委员会审定的食品专业基础课试用教材,先作为教学参考书出版。该书自发行以来,一直被全国许多食品相关专业点所采用,并于1992年荣获国家教育委员会第二届普通高等院校全国优秀教材奖。自初版迄今,历经6次印刷,总印数累计达6万多册。该书不仅对高等院校食品相关专业的教学改革起了巨大的推动作用,也有力地引发了中等专业技术学校相关专业相应课程的改革,产生了多种相应的《食品工程原理》中专教材。其影响所及,其在改革开放年代里所表现出来的符合时代特征的品性,以及其所拥有的愈来愈多的广大读者,都足以证明10多年前该书创意的可取和10多年来该书出版的价值。

为了适应食品工业生产朝着现代化迅速发展的需要,作为高等院校食品专业基础课正式教材的《食品工程原理》的出版也势在必行。

本书的编写将气体压缩、真空技术、制冷技术中的某些有用的内容归入相应的章节中去;(混合、乳化中的搅拌和均质独立分出来各作一节予以强化;蒸发、结晶、冷冻浓缩)一章,则加入冷冻一节。其他各章的构架,则具有以单元操作名称命名的简明、直观、查考方便的特点。各章的编排次序原则上按动量传递、热量传递和质量传递的次序编排,以符合由浅入深循序渐进的教学原则。

对各章节的内容进行重组和补充是对原试用教材修订工作的主要方面。大部分内容均按先介绍原理和计算而后讨论设备的次序编排,目的在于突出原理。根据近年来食品工程技术的新进展,重点增订和修订的内容有压榨、粉碎、筛分、冷冻、均质、乳化、膜分离、浸取等。对原试用教材中一些主要涉及其他学科的内容,则酌情作了简化处理。同时,对各章的练习题,作了较多的补充,并对原有的例题和练习题,均作了仔细的校订。

此外,还对量的符号和单位给予充分的重视。不仅继续沿用SI制,并在认真贯彻国家标准,严格做到规范化方面下了功夫。按照国家标准GB3100~3102-93的规定,废除了一些旧的概念,如分子量、当量、内能、绝对温度等,分别代之以相对分子质量或摩尔质量、摩尔、热力学能、热力学温度等符合标准的概念。特别是将附录中的表头改为国际规定的表示法。特别是附录中,凡涉及非SI制单位的,均作了重新换算。

参加本书编写工作的人员有:徐涵庆(第一章);冯磊(第二章第1~2节,第六章第1节,第七章第1~2节,第八章第4~5节,第十章);郑建仙(第二章第3~5节,第四章);顾瑾(第三章,第五章,第八章第1~3节);许学勤(第六章第2~4节,第七章第3~4节,第十一章第6~7节);许林妹(第九章,第十一章第1~5节);韩榕涛(附录)。

全书由高福成统稿和审定,由冯磊协助。

由于水平有限,缺点错误在所难免,热情欢迎广大读者批评指正。

编者

1998年10月

目 录

绪论	(1)
第一章 流体流动和输送	(7)
第一节 流体静力学及其应用	(7)
一、流体的物理性质与作用力	(7)
二、流体静力学基本方程及其应用	(12)
第二节 流体在管内流动时的能量衡算	(15)
一、物料衡算与管内流动的连续性方程式	(15)
二、稳定流动热力体系的总能量方程式	(18)
三、不可压缩理想流体的稳定流动	(20)
第三节 流体流动现象分析	(23)
一、流动的形态	(23)
二、湍流流动	(24)
三、边界层流动	(26)
第四节 管内流动阻力和速度分布	(27)
一、沿程阻力(或沿程损失)	(28)
二、局部阻力或局部损失	(33)
三、管径的选择	(36)
第五节 流量的测量	(37)
一、毕托管	(37)
二、孔板、喷嘴和文丘里管	(38)
三、转子流量计	(40)
第六节 非牛顿流体的流动	(42)
一、非牛顿流体的分类	(43)
二、非牛顿流体管内流动的流量和速度分布	(45)
三、非牛顿流体流动的阻力	(48)
第七节 离心泵	(50)
一、离心泵的工作原理和主要部件	(50)
二、离心泵的性能	(52)
三、离心泵的工作点、流量调节和安装高度	(55)
四、离心泵的类型与选型	(58)
五、离心泵的安装和使用	(61)
第八节 其他类型泵	(61)
一、叶片式泵	(62)
二、容积式泵	(63)

第九节 气体输送机械	(69)
一、通风机、鼓风机的类型	(69)
二、通风机的性能和选择	(70)
第十节 压缩机	(72)
一、热力学第一定律用于封闭体系	(73)
二、往复式压缩机的原理	(75)
三、往复式压缩机的类型及其他型式压缩机	(80)
第十一节 真空泵	(84)
一、有关真空泵和真空系统的基本概念	(84)
二、真空泵的分类、选择及型号	(86)
三、真空泵的工作原理	(88)
四、真空管道流导计算	(92)
本章符号	(93)
本章习题	(95)
第二章 沉降、过滤、离心分离、压榨	(100)
第一节 沉降	(100)
一、颗粒在流体中的运动	(100)
二、悬浮液沉降分离的设备及其计算	(105)
第二节 过滤	(107)
一、过滤的基本概念和理论	(108)
二、过滤设备与操作	(115)
第三节 离心分离	(122)
一、离心分离理论	(123)
二、沉降式离心机	(126)
三、过滤式离心机	(129)
四、分离式离心机	(135)
第四节 气溶胶分离	(139)
一、气溶胶及其分离方法	(139)
二、重力沉降与惯性分离	(142)
三、旋风分离	(145)
四、过滤除尘	(149)
五、湿法净制与电除尘	(152)
第五节 压榨	(155)
一、压榨理论	(156)
二、压榨设备	(160)
本章符号	(165)
本章习题	(167)
第三章 流态化和气力输送	(169)
第一节 固体流态化	(169)

一、固体流态化的原理和基本概念	(169)
二、流化床的流体力学	(172)
三、流化床的结构形式	(178)
第二节 气力输送	(183)
一、气力输送的原理和基本概念	(183)
二、气力输送系统的组成	(186)
三、气力输送系统的计算	(191)
本章符号	(196)
本章习题	(197)
第四章 粉碎、筛分	(198)
第一节 粉碎	(198)
一、粉碎理论	(198)
二、磨介式粉碎	(206)
三、冲击式粉碎	(209)
四、转辊式粉碎	(211)
五、切割碎解	(215)
六、食品粉碎机的选用	(216)
第二节 筛分	(217)
一、筛分理论	(217)
二、往复振动式筛分	(224)
三、高速振动式筛分	(227)
四、平面回转式筛分	(230)
五、转筒式筛分	(233)
本章符号	(234)
本章习题	(235)
第五章 传热	(236)
第一节 热传导	(236)
一、热传导的基本概念和傅里叶定律	(236)
二、平壁热传导	(240)
三、圆筒壁的热传导	(241)
第二节 对流传热	(243)
一、对流传热的分析	(244)
二、对流传热的速率	(244)
三、传热边界层	(246)
第三节 传热计算	(247)
一、热量衡算	(247)
二、总传热速率方程	(247)
三、平均温度差	(250)
四、传热的强化	(253)

第四节 表面传热系数关联式	(254)
一、对流传热的准数方程	(254)
二、流体无相变时的表面传热系数关联式	(257)
三、流体有相变时的表面传热系数关联式	(264)
第五节 辐射传热	(267)
一、基本概念和定律	(267)
二、两固体间的辐射传热	(270)
三、对流和辐射的联合传热——设备的热损失	(273)
四、辐射加热方法	(274)
第六节 几种特殊情况下的传热	(276)
一、不稳定热传导	(277)
二、流体的间歇式传热	(280)
三、非牛顿流体的传热	(281)
四、流化床中的传热	(283)
第七节 换热器	(287)
一、管式换热器	(287)
二、板式换热器	(291)
三、混合式换热器	(294)
本章符号	(296)
本章习题	(297)
第六章 蒸发、结晶、冷冻、冷冻浓缩	(301)
第一节 蒸发	(301)
一、蒸发的基本概念	(301)
二、单效蒸发	(305)
三、多效蒸发	(308)
四、蒸发设备	(317)
第二节 结晶	(324)
一、基本概念与结晶原理	(325)
二、结晶方法与设备	(332)
三、结晶操作的基本计算	(337)
第三节 冷冻	(345)
一、制冷基本概念和原理	(346)
二、食品的冻结过程	(352)
三、食品冻结方法与装置	(359)
第四节 冷冻浓缩	(364)
一、冷冻浓缩的理论和方法	(365)
二、冷冻浓缩装置系统	(369)
本章符号	(373)
本章习题	(374)

第七章 搅拌、混合、均质、乳化	(377)
第一节 液体的搅拌	(377)
一、混合的基本理论	(377)
二、搅拌系统	(380)
三、搅拌槽内液体的流动特性和功率消耗	(382)
四、搅拌系统的放大	(387)
第二节 几种特殊场合下的搅拌与混合	(389)
一、非牛顿流体的搅拌	(389)
二、高粘度流体的搅拌	(389)
三、液-固系统的混合	(391)
四、高粘度浆体和塑性固体的混合	(392)
五、固体的混合	(394)
六、搅拌槽中的传热	(396)
第三节 均质	(397)
一、液体食品与均质	(398)
二、均质机理与常用均质设备	(399)
三、均质效应与均质处理方式	(407)
第四节 乳化	(411)
一、乳化液的类型与稳定性	(411)
二、食品乳化剂	(413)
三、乳化液制备与乳化设备	(418)
本章符号.....	(423)
本章习题.....	(424)
第八章 吸收、吸附、离子交换	(426)
第一节 传质原理	(426)
一、单相中的扩散	(426)
二、相际间的传质	(432)
三、自由界面相际传质理论	(433)
第二节 吸收与脱吸	(436)
一、吸收操作中的气-液相平衡	(436)
二、吸收速率	(439)
三、吸收(或脱吸)塔计算	(440)
第三节 填料塔	(450)
一、填料塔的结构与填料	(450)
二、填料塔的流体力学性能	(454)
第四节 吸附	(457)
一、吸附的基本概念与吸附剂	(457)
二、吸附分离理论	(459)
三、吸附计算	(462)

四、吸附设备与操作	(466)
第五节 离子交换	(468)
一、离子交换的基本概念与离子交换树脂	(468)
二、离子交换理论	(472)
三、离子交换操作与设备	(477)
四、离子交换操作的计算	(481)
本章符号	(485)
本章习题	(487)
第九章 蒸馏、萃取、浸取	(491)
第一节 蒸馏	(491)
一、两组分系统的气液平衡	(491)
二、平衡蒸馏与简单蒸馏	(496)
三、两组分连续精馏原理	(498)
四、两组分连续精馏的计算	(501)
五、水蒸气蒸馏	(511)
六、分子蒸馏	(513)
第二节 板式塔	(515)
一、板式塔的结构	(515)
二、板效率	(517)
三、塔高和塔径	(518)
四、塔的流体力学性能	(518)
第三节 液-液萃取	(520)
一、液-液相平衡	(520)
二、萃取过程的计算	(525)
三、液-液萃取设备	(532)
第四节 浸取	(533)
一、浸取理论	(534)
二、传质机理与浸取速率	(535)
三、浸取操作的计算	(541)
四、浸取设备	(548)
本章符号	(550)
本章习题	(551)
第十章 膜分离过程	(557)
第一节 微滤和超滤	(557)
一、微滤和超滤的过程特征和膜	(557)
二、预测滤液通量的数学模型	(560)
三、微滤和超滤设备	(564)
四、微滤和超滤在食品工业中的应用	(566)
第二节 反渗透	(567)

一、反渗透的原理	(567)
二、描述反渗透过程的数学模型	(569)
三、反渗透设备及其应用	(571)
第三节 电渗析	(573)
一、电渗析过程的原理	(573)
二、电渗析中的传递	(574)
三、电渗析的基本概念	(576)
四、电渗析装置	(579)
五、电渗析设计计算	(581)
六、电渗析的应用	(582)
第四节 渗透汽化	(583)
一、渗透汽化的原理	(583)
二、传质机理和模型	(584)
三、渗透汽化的模型和设备计算	(586)
本章符号	(588)
本章习题	(590)
第十一章 干燥和空气调节	(591)
第一节 湿空气的性质	(591)
一、湿空气的状态参数	(592)
二、湿空气的 t_m - H 图	(595)
三、低温区湿空气 t_m - H 图的特点	(597)
四、湿空气的基本状态变化过程	(598)
第二节 干燥静力学	(601)
一、湿物料的形态和含水量	(601)
二、干燥系统的物料衡算	(602)
三、干燥系统的热量衡算	(603)
四、空气通过干燥器的状态变化	(604)
第三节 干燥动力学	(608)
一、物料中的水分	(608)
二、干燥机理	(610)
三、恒定干燥情况下干燥时间的计算	(615)
第四节 干燥设备	(617)
一、干燥器的分类	(617)
二、对流干燥器	(618)
三、传导干燥器	(625)
四、辐射干燥器	(627)
五、干燥器的选择和设计	(630)
第五节 喷雾干燥	(634)
一、喷雾器	(635)

二、喷雾干燥室和液滴在干燥室中的干燥	(638)
三、喷雾干燥装置系统	(640)
四、喷雾干燥器基本设计计算	(643)
第六节 空气调节	(648)
一、空气调节系统基本原理及类型	(648)
二、直流式空气调节系统	(649)
三、一次回风式空气调节系统	(651)
四、二次回风式空气调节系统	(653)
五、空气调节设备的计算	(654)
第七节 冷冻干燥	(655)
一、冷冻干燥的理论基础	(656)
二、冷冻干燥装置	(661)
本章符号	(667)
本章习题	(669)
附录	(672)
附录一、单位换算和物理常数	(672)
附录二、物理性质数据	(676)
附录三、型号、规格、规范	(693)



绪 论

现代食品工业与化学工程学之间的关系，随着食品工业的发展而愈来愈密切。

大约在 80 年前，开发石油面临着各种重要的课题，化学工程学就是从这时期以后发展起来的一门工程学。所以，从其发展过程来看，它是以蒸馏技术、吸收技术、加热炉技术、过滤技术等石油工业所必要的技术设计理论基础为主体的学科。

人们在长期从事化工生产实践中，自然而然地把组成不同化工行业生产过程所共有的基本操作过程抽提出来，研究其各自的内在规律性，并在理论上加以总结和提高，再应用到生产实践中去。这些基本操作过程称为化工单元操作。例如上述蒸馏、吸收、加热炉技术等即属于此。这样，化工生产虽然行业繁多，制造方法也各不相同，但究其实，均不过是若干个单元操作经过合理地组合并加以运用而已。

单元操作的概念是强有力的。单元操作的划分不仅有可能去统一通常被认为是各不相同的独立的化工生产技术，而且有可能使人们系统而深入地研究每一单元操作的内在规律和基本原理，从而更为有效地促进化工生产技术的发展。而所有这些单元操作的综合，就构成了化学工程的基础学科——化学工程原理。

从历史上看，食品加工的出现远较化学加工为早。人类以家庭烹调和手工方式加工食品延续了许多世纪之久，但食品工业的出现则仅是百年来的事。在这中间，食品工业仍然处于“必然王国”的时期又是漫长的。长期以来食品工业是以其加工经验和传统方法为其生产方式的基础。时至今日，仍有许多食品的生产，与其说是科学，不如说是艺术。食品加工的这一事实有力地说明，虽然食品工业的出现较化学工业为早，但食品科学的出现则远较化学工业为晚。就科学意义上说，化学工业的进展是遥遥领先的。只是从较晚的时期起，科学才开始进入食品加工领域，产生了年轻的食物科学。

食品加工科学化的一个重要方面是化工单元操作的引入和运用。虽然化工单元操作被引入食品加工领域为时较晚，但一旦引入和运用，就更促进食品工业迅速向着大规模、连续化、自动化的生产发展。例如，以豆类为原料制造蛋白质制品和饲料的现代化工程就是具体运用这些化工单元操作的典型成果。前者是由粉碎、离心分离、沉降、浓缩、喷雾干燥，后者是由粉碎、配料、混合、造粒等单元操作科学而巧妙地组合而成的食品工程。

食品工业中引入和运用化工单元操作的研究之所以如此迟缓，主要的原因是在原料性质上存在着极为显著的差别。

食品加工的原料是农、林、牧、副、渔业的动植物产品。这些原料的结构和成分非常复杂。原料的成分随品种、成熟度及贮藏条件而变化。某些成分如蛋白质、酶之类都是生物学活性的物质，在加工条件下会引起变性、钝化或破坏。某些成分如色素、脂肪等，在有氧气存在的条件下，也会发生变色或腐败。而某些芳香类物质则又会因加工条件不当而损失。总之，作为人类食用的食品，不得不考虑在加工时这些色、香、味、营养成分的变化问题。这就是长期以来食品加工固守传统方法的原因所在。

然而，也正因为加工原料和加工要求有如上述的特殊性，所以化工单元操作一经与食品加工相结合，就产生课题研究方向的不同，从而其实践经验积累也不相同。

热敏性和氧化变质是动、植物原料显而易见的共有特点。为避免食品加工的高温破坏和氧化变质，加工条件就不得不采用低温、低压，特别是低压。在一定条件下，低温是与低压紧密相关的。所以单元操作的理论研究和运用就更多地集中于诸如真空输送、真空过滤、真空脱气、真空冷却、真空蒸发、真空结晶、真空造粒、真空干燥、真空蒸馏、真空成型、真空包装、冷冻浓缩、冷冻升华干燥等方面。

易腐性是食品加工原料和制品共有的又一明显特点。食品加工原料和制品含有人类不可缺少的多种营养物质，因而也是微生物活动的良好场所。食品正是在这种微生物及其本身所含的酶的作用下发生腐败变质的。食品加工的目的，就在于如何抑制这些微生物和酶的活动，以便于提高制品的保藏性。因此，浓缩食品、干制食品、冷冻和速冻食品已成为目前食品工业上的重要工业食品。而作为这些食品加工基础的浓缩、干燥和冷冻等单元操作，就势必在食品加工工程中占有特别重要的地位。而且，由于上述食品加工对低温和真空的要求，一般的蒸发浓缩、热风干燥和冷冻等方法已远不能满足全部要求。这样近年来又逐渐开发了新型的冷冻浓缩、半透膜浓缩、辐射干燥、冷冻升华干燥、低温冷冻、速冻等食品加工操作。由此可见，化工单元操作一经与食品加工相结合，必然给食品工程本身带来它所需要的许多特点。就浓缩、干燥、冷冻这三者来说，其进展反而较化学工业为迅速。

用于食品加工的动、植物性原料，其相态几乎全部为固态和液态。这点与化工主要生产部门（如酸、碱、氮肥、石油化工等）所经常遇到的，以气相加工为主的过程是截然不同的。在化学工业方面，吸收、蒸馏是占有突出地位的操作。在食品工业方面，要使固体或液体原料成为多种美味可口、营养丰富的食品，首先必须提取其精华，扬弃其糟粕，分离出不同成分并组合制成不同种类的制品。同时为了做到有益无毒，风味别致，又必须反复提纯和精制。所以有关提取、分离、净制，以及混合、乳化、粉碎等单元操作就必须相应占有相当重要的地位。在食品工业中，不仅一般的液体吸附、离子交换、固体浸出、过滤分离成为重要的单元操作，而且由于食品加工的特殊需要，近年来已开发了半透膜分离技术、电渗析技术、凝胶过滤、酶萃取等新型的提取、分离和提纯操作。必须指出，在食品工业中，水是具有特殊意义的液体，它既是一般的工业用水，又是生产某些饮料（包括汽水、啤酒、果汁等）的主要原料水。要达到严格的原料水要求，不只是一般的软化问题，而且还涉及到纯水的制造问题，这也不外乎使用分离、提纯的一系列单元操作。最后，还必须指出，食品生产中所遇到的固体物料不同于化工生产的原料，往往具有硬度低、有韧性等特点。

食品加工过程中的液体原料、液体半成品和液体成品多为非牛顿液体。凡是源出于生物系统的液体，如蛋白质和多糖类的溶液、天然形成的高分子聚合物，不论是液态或溶解状态，都多少带有非牛顿性质。非牛顿液体的性质与如水之类的牛顿液体不同，所以在流体食品的输送、加热或冷却以及搅拌混合等方面都具有非牛顿液体的特性，这也是反映在食品工程上的一种特色。

由此可见，食品工程单元操作与化工单元操作两者既有彼此相联系之处又有本身的特殊性。现代多种学科都面临着综合和分化的课题，同样，化工单元操作正在向食品工

业渗透, 经过这些单元操作在食品加工领域内的实践和提高, 并结合适应食品加工特殊要求的新单元操作的开发, 近年来食品工程单元操作这一新的学科已开始形成。国外有关这方面的教科书和参考书颇多, 如“Food Engineering Operations”、“Elements of Food Engineering”、“Food Process Engineering”、“Fundamentals of Food Engineering”、“Process Engineering in the Food Industries”、“Unit Operations in Food Processing”等等。在这些书籍中, 关于单元操作的取舍组合, 均各有其特点, 论述也繁简不同。

本书暂名“食品工程原理”, 读者有必要时可参阅上述书籍和杂志。

关于单位和量纲

凡参与生产过程的物料, 既具有各种各样的物理性质(如密度、粘度、导热系数等), 又具有表示过程特征的参变数(如温度、压力、速度等)。此等物理量虽然种类很多, 但均可通过几个彼此独立的基本量来表示其性质和特征。代表这些基本量的符号称为量纲或因次(dimension)。常用的量纲有长度 $[L]$ 、质量 $[m]$ 或力 $[F]$ 、时间 $[t]$ 和温度 $[\theta]$ 等。其他物理量均可通过固有的物理关系与基本量联系起来, 称为导出量。所以其他导出量都可按如下形式表示出来。

$$[Q] = L^\alpha m^\beta t^\gamma \dots\dots$$

此式称为物理量 Q 的量纲式, 而 $\alpha, \beta, \gamma \dots\dots$ 则可以是任意的有理数。

量纲式明显地表示出导出量与基本量之间的关系, 揭示了物理量的特性。它对于单位换算、验算结果的准确性, 具有实用的意义。物理方程因次一致的原则(即物理方程等号两边各项对应量纲的指数相等)是整理实验数据常用方法(量纲分析法)的依据。

单位制是基本单位与导出单位的总和。基本量的单位称为基本单位, 通过基本单位而导出的单位称为导出单位。

基本量和基本单位的选择, 各种单位制均不相同, 但通常均取长度和时间作为基本量, 因此各种单位制中, 速度的因次式为 LT^{-1} , 加速度的因次式为 LT^{-2} , 体积的因次式为 L^3 。

一个物体的体积并没有把它所含有的物质数量完全加以确定, 因此通常还要规定第三个基本量。选取第三个基本量有两种方法, 一是选取物体中物质的数量, 即其质量 $[m]$ 。这样构成的单位制称为质量单位制或绝对单位制, 例如cgs制和MKS制。在这些单位制中, 力就变成导出量。但是, 在工程实际中, 经常需要考虑物体的重量和所受的力, 而且物体的质量一般都是通过它的重量来测定的, 因而选择力作为第三个基本量就比较方便。这样构成的单位制就称为重力单位制或工程单位制。在此单位制中, 长度单位是米(m), 力的单位是公斤(kg), 时间的单位是秒(s), 质量就变成导出量。

在工程单位制中, 力的单位“kg”的规定相当于在真空中以MKS制量度的1kg质量的物体, 在重力加速度为 9.80665m/s^2 处所受的重力。根据牛顿第二定律 $F=ma$ 各种力的单位之间有如下的关系:

$$\begin{aligned} 1\text{kg} &= 1\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2 = 9.81\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81\text{N} \\ &= 1\,000\text{g} \times 981\text{cm/s}^2 = 981\,000\text{g} \cdot \text{cm/s}^2 \\ &= 981\,000\text{dyn} \end{aligned}$$

国际单位制 (SI 制) 是国际度量衡会议于 60 年代初期提出的一种新的单位制度, 它是米制发展的现代形式。这种单位制目前在国际上已普遍使用于整个科学和工程的领域。1977 年我国国家标准计量局确定, 我国将逐步采用国际单位制。本书所采用的单位制, 主要就是这种单位制。但考虑到过去自然科学和工程技术领域所使用的其他单位制, 所以必要时也兼用其他单位制。

在力学范围内, SI 制的基本量和基本单位完全与 MKS 制相同, 即长度的单位为米 (m), 质量的单位为千克 (kg), 时间的单位为秒 (s)。常见的几种单位制所用的力学基本量和基本单位如表 0-1 所示。

表 0-1 常见单位制的力学基本量和基本单位

单位制 \ 基本量	长 度		质 量		力		时 间	
	中文名	代号	中文名	代号	中文名	代号	中文名	代号
SI 制	米	m	千克	kg	—	—	秒	s
MKS 制	米	m	千克	kg	—	—	秒	s
cgs 制	厘米	cm	克	g	—	—	秒	s
工程单位制	米	m	—	—	公斤	kgf	秒	s

SI 制总共采用七个基本量和基本单位。除上述力学中采用的 m、kg、s 这三个之外, 在热学中采用热力学温度“开尔文”, 简称开, 代号为 K; 在光学中采用发光强度的单位“坎德拉”, 简称坎, 代号为 cd; 在电学中采用电流的单位“安培”, 简称安, 代号为 A; 在化学和分子物理学中采用物质的量的单位“摩尔”, 简称摩, 代号为 mol。在本学科范围内, 主要涉及力学、热学、化学和分子物理学领域, 故常用的单位是 m、kg、s、K 和 mol 这五个。

在 SI 制中, 于所论的学科范围内, 按上述的基本量的基本单位来量度, 就可以确定有关物理方程中的比例因数, 或者适当选取比例因数, 推出导出量的导出单位。主要物理方程是:

$$F = K_1 \frac{d}{dt}(mu) \quad (0-1)$$

$$F = K_2 \frac{m_1 m_2}{d_2} \quad (0-2)$$

$$Q = K_3 W \quad (0-3)$$

$$T = \frac{1}{K_4} \lim_{p \rightarrow 0} \frac{pV}{m} \quad (0-4)$$

式中, F 为力; t 为时间; m 为质量; u 为速度; d 为距离; W 为功; Q 为热; p 为压力; V 为体积; T 为热力学温度; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为比例因数。

选取 $K_1=1$, 方程式 (0-1) 就成为 $F=d(mu)/dt$, 从而导出力的单位牛顿为:

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

有了这样的力的单位牛顿之后, 方程式 (0-2) 中的比例因数就不再能任意选取, 而取决于实验的数值, 即:

$$K_2 = 6.6732 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

在 SI 制中，功和能的单位均以牛顿米来量度，称为焦耳，简称焦，代号为 J，即：

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$$

对于热量，如果选取方程式 (0-3) 中的 $K_3=1$ ，则：

$$Q = W$$

所以在 SI 制中，热与功一样，都是以焦耳为其单位。

又，在 SI 制中，温度、能量和质量的单位既定，则式 (0-4) 中气体常数 K_4 仅随气体的种类而异。但当采用摩尔作为量的单位时，则 K_4 即为通用气体常数 R_M 所代替。通用气体常数按 Avogadro 定律对所有理想气体均为同一数值，即：

$$R_M = 8314 \cdot 34\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

在 SI 制中，规定了如表 0-2 中所列具有专用名称的导出单位，可以用它们和基本单位一起表示其他导出单位。

表 0-2 具有专用名称的 SI 制导出单位（热力学范围）

物理量	单位中文名称	国际单位符号	用其他导出单位表示	用基本单位表示
频率	赫兹	Hz	—	s^{-1}
力	牛顿	N	—	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
压力、应力	帕斯卡	Pa	N/m^2	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
能、功、热	焦耳	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
功率	瓦特	W	J/s	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

用上述专用名称导出单位和基本单位一起表示的常见物理量列于表 0-3 中。

表 0-3 用专用名称导出单位的 SI 制导出单位

物 理 量	单位中文名称	国际单位符号	用基本单位表示
(动力) 粘度	帕·秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
表面张力	牛/米	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热流密度、辐射照度	瓦/米 ²	W/m^2	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
热容、嫡	焦/开	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比热容、比嫡	焦/(千克·开)	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比能	焦/千克	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
能密度	焦/米 ³	J/m^3	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热导率	瓦/(米·开)	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
传热系数	瓦/(米 ² ·开)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

此外，SI 制还规定了一套词冠来表示单位的倍数或分数。常用的有：M 表示兆 (10^6)，k 表示千 (10^3)，h 表示百 (10^2)，da 表示十 (10^1)，d 表示分 (10^{-1})，c 表示厘