

全国高等医药院校药类教材

化工原理

Hua gong Yuan li

梁忠英 主编



中国医药科技出版社

全国高等医药院校药学类教材

化 工 原 理

(供药学类专业用)

主 编 梁忠英

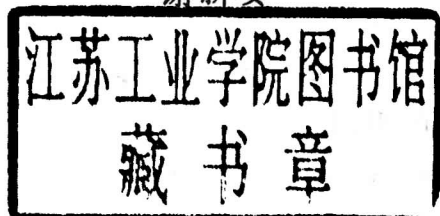
副主编 宫锡坤

编 委 (以姓氏笔画为序)

王存文 何志成 邵 伟

周丽莉 宫锡坤 梁忠英

谢新安



中国医药科技出版社

登记证号：(京) 075 号

内 容 提 要

本书重点介绍了制药化工单元操作的基本概念、基本原理、典型设备及其工艺计算。

全书除绪论和附录外，还有流体力学基础、流体输送机械、非均一系的分离、传热、蒸发与结晶、气体吸收、液-液萃取、蒸馏、固体干燥等九章。各章末均有习题，且附有答案。

本书适用于化工、医药院校《化工原理》课程较少学时的专业。在编写过程中考虑到利于教学、便于自学，力求语言流畅、推理清楚、主次分明。此外，还注意到了制药化学工业的新进展，可供科研、设计及生产单位的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/梁忠英等主编. —北京：中国医药科技出版社，2002.8

全国高等医药院校药学类教材

ISBN 7-5067-2622-X

I. 化… II. 梁… III. 制药工业-化工原理-医学院校-教材 IV. TQ460.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 050123 号

中国医药科技出版社 出版
(北京市海淀区文慧园北路甲 22 号)
(邮政编码 100088)

北京友谊印刷有限公司 印刷
全国各地新华书店 经销

*

开本 787×1092mm $\frac{1}{16}$ 印张 30 $\frac{3}{4}$
字数 709 千字 印数 1—5000
2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

定价：48.00 元

本社图书如存在印装质量问题，请与本社联系调换 (电话：62244206)

全国高等医药院校药学类教材编委会(第一届)

名誉主任委员	吴阶平 蒋正华 卢嘉锡
名誉副主任委员	郑筱萸 林蕙青
主任委员	吴晓明(中国药科大学校长)
副主任委员	吴春福(沈阳药科大学校长)
	黄泰康(中国医药科技出版社社长兼总编)
	彭师奇(北京大学药学院院长)
	叶德泳(复旦大学药学院副院长)
	张志荣(四川大学华西药学院院长)
委 员	(按姓氏笔画排列)
	丁 红(山西医科大学药学院院长)
	史录文(北京大学医学部副主任)
	朱景申(华中科技大学同济药学院教授)
	刘永琼(武汉化工学院药学系副主任)
	吴继洲(华中科技大学同济药学院院长)
	杨世民(西安交通大学药学院院长)
	罗向红(沈阳药科大学教务处副处长)
	梁 仁(广东药学院院长)
	娄红祥(山东大学药学院院长)
	姜远英(第二军医大学药学院院长)
	姚文兵(中国药科大学教务处处长)
	曾 苏(浙江大学药学院院长)

全国高等医药院校药学类教材编写办公室

主 任	姚文兵(中国药科大学教务处处长)
副 主 任	罗向红(沈阳药科大学教务处副处长)
	连建华(广东药学院教务处副处长)
	程牛亮(山西医科大学教务处处长)

编 写 说 明

为适应我国高等医药教育的改革和发展、满足市场竞争和医药管理体制对药学教育的要求,全国高等医药院校药学类教材编委会组织编写了“全国高等医药院校药学类教材”。

本套教材是在充分向各医药院校调研、总结归纳当前药学教育迫切需要补充一些教学内容的基础上提出编写宗旨的。本套教材的编写宗旨是:编写一套成体系、药学特色鲜明、具有前瞻性、能体现现代医药科技水平的高质量的药学教材。也希望通过教材的编写帮助各院校培养和推出一批优秀的中青年业务骨干,促进药院校之间的校际间的业务交流。

参加本套教材的编写单位有:中国药科大学、沈阳药科大学、北京大学药学院、广东药学院、华西医科大学药学院、山西医科大学、同济医科大学药学院、复旦大学药学院、西安交通大学药学院、山东大学药学院等数二所药院校。

教材的编写尚存在一些不足,请各院校师生提出指正。

全国高等医药院校药学类
教材编写办公室
2001.9.3

前 言

本书是为满足化工、医药院校化工原理课程较少学时专业的教学需要而编写的。

本书既注意了理论的完整性和系统性，又考虑到学时较少，因而语言精练、重点突出；为了强化学生的工程观点，全书无论从理论的阐述上，还是从例题及习题的选取上，都注重了理论联系实际；为了便于自学，各章末习题均附有答案。

参加各章编写的编委均是从事多年教学和工程实践的同志，在编写过程中参考了国内外的相关教材和专著，并收集了大量的、工程中常用的数据和图表，对从事科研、设计的技术人员均有参考价值。

本书由梁忠英任主编，官锡坤任副主编。参加编写工作的有：山东大学药学院的邵伟副教授（第六章）、广东药学院的谢新安副教授（第九章）、武汉化工学院的王存文副教授（第四章）、沈阳药科大学的何志成副教授（第一章）、周丽莉副教授（第七章）、官锡坤副教授（第八章）、梁忠英教授（绪论、第二章、第三章、第五章及附录）。

在成书过程中，得到了中国医药科技出版社和沈阳药科大学领导的有力支持和帮助，编者所属各院校亦在工作上给予协助和方便，在此深致谢意。

由于编者学识有限，欠妥之处在所难免，甚望读者本着扶持一本适用教材的精神，指出不足，以便日后修订。

编者

2002年7月

(59)

(60)

(62)

目录

绪论	(1)
一、本课程的内容、性质和任务	(1)
二、基本的研究方法	(2)
三、单位制和单位换算	(3)
第一章 流体力学基础	(8)
第一节 流体静力学基本方程	(8)
一、密度、比容和相对密度	(8)
二、流体的压强	(9)
三、流体静力学基本方程	(11)
四、流体静力学方程在实际生产中的应用	(12)
第二节 流体动力学基本方程	(15)
一、流量与流速	(15)
二、稳定流动与不稳定流动	(16)
三、流体稳定流动时的物料衡算——连续性方程	(17)
四、流体稳定流动时的机械能衡算——柏努利方程	(19)
第三节 流体在管内的流动阻力	(26)
一、流体阻力的表现形式——压降	(26)
二、流体的粘度	(26)
三、流体的流动型态	(28)
四、流体流动时的阻力计算	(32)
五、管路计算	(44)
第四节 流速与流量的测量	(47)
一、测速管(毕托管)	(47)
二、孔板流量计	(48)
三、转子流量计	(51)
第二章 流体输送机械	(59)
第一节 离心泵	(59)
一、离心泵的结构和作用原理	(59)
二、离心泵的主要性能	(60)
三、离心泵的特性曲线	(62)

四、离心泵的安装高度	(64)
五、离心泵的流量调节及组合操作	(67)
六、离心泵的安装和运转	(69)
七、离心泵的类型	(70)
第二节 其他类型泵	(71)
一、正位移泵	(71)
二、旋涡泵	(75)
三、流体作用泵	(76)
第三节 气体输送与压缩机械	(76)
一、通风机	(77)
二、鼓风机	(80)
三、压缩机	(81)
四、真空泵	(83)
第三章 非均一系的分离	(88)
第一节 气相非均一系的分离	(88)
一、重力沉降	(88)
二、离心沉降	(92)
三、其他气体净制设备	(97)
第二节 液相非均一系的分离	(100)
一、过滤	(100)
二、离心分离设备——离心机	(109)
第四章 传热	(115)
第一节 概述	(115)
一、传热在化工生产中的应用	(115)
二、传热的三种基本方式	(115)
三、间壁式换热器传热过程与传热速率方程式	(116)
第二节 热传导	(117)
一、基本概念	(117)
二、傅立叶定律	(118)
三、导热系数	(118)
四、平壁的稳态热传导	(121)
五、圆筒壁的稳态热传导	(124)
第三节 对流传热	(127)
一、总传热系数	(128)
二、热量衡算式与传热速率方程间的关系	(132)
三、传热平均温度差	(134)
四、壁温的计算	(139)
第四节 对流传热系数的计算	(142)

一、影响对流传热系数的因素	(142)
二、对流传热中的量纲分析	(142)
三、流体无相变时对流传热系数的关联式	(144)
四、流体有相变时的对流传热系数	(152)
五、选用对流传热系数关联式的注意事项	(156)
第五节 热辐射	(157)
一、基本概念	(157)
二、物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律	(158)
三、克希霍夫定律	(160)
四、两固体间的相互辐射	(160)
五、设备热损失的计算	(163)
第六节 换热器	(165)
一、换热器的分类	(165)
二、间壁式换热器	(165)
三、列管式换热器选用计算中的有关问题	(171)
四、系列标准换热器的选用步骤	(174)
五、加热介质与冷却介质	(177)
六、传热过程的强化	(178)
第五章 蒸发与结晶	(185)
第一节 蒸发	(185)
一、蒸发过程的基本概念	(185)
二、蒸发设备	(186)
三、多效蒸发	(192)
四、单效蒸发的工艺计算	(194)
第二节 结晶	(200)
一、结晶原理	(200)
二、结晶的工业方法及设备	(202)
第六章 气体吸收	(207)
第一节 工艺中的吸收操作	(207)
一、吸收操作的基本概念	(207)
二、吸收操作中的主要问题	(207)
三、吸收操作在工业生产中的应用	(208)
第二节 吸收的基本原理	(209)
一、气体在液体中的溶解度	(209)
二、亨利定律	(210)
三、吸收速率	(212)
四、双膜理论	(216)
五、吸收速率方程式	(217)

第三节 填料吸收塔的工艺设计	(225)
一、填料吸收塔	(226)
二、吸收剂的用量计算	(230)
三、塔径及填料层压强降	(235)
四、填料层高度	(240)
五、填料塔的附属设备	(256)
第四节 其他吸收设备	(261)
一、工业用吸收罐	(261)
二、喷洒式吸收器	(261)
三、湍球塔	(262)
第七章 液-液萃取	(267)
第一节 概论	(267)
一、萃取过程	(267)
二、萃取在工业生产中的应用	(267)
三、液-液萃取中常见的物系和萃取流程	(269)
第二节 液-液萃取的相平衡及萃取速度	(271)
一、液-液萃取的相平衡	(272)
二、液-液萃取过程的速度	(277)
三、萃取剂的选择原则	(279)
第三节 萃取过程工艺计算	(282)
一、萃取剂与稀释剂部分互溶物系工艺计算	(282)
二、萃取剂与稀释剂不互溶物系工艺计算	(292)
第四节 液-液萃取设备	(299)
一、萃取设备概述	(299)
二、萃取设备的主要类型	(301)
三、萃取设备的选择	(306)
第八章 蒸馏	(311)
第一节 基本概念	(312)
一、完全互溶液体混合物的相平衡	(312)
二、相对挥发度	(315)
第二节 精馏过程	(317)
一、精馏原理	(317)
二、精馏塔和精馏操作流程	(320)
第三节 双组分溶液连续精馏的计算	(321)
一、全塔物料衡算	(321)
二、操作线方程	(322)
三、进料状态的影响	(325)
四、理论板层数的求法	(327)

五、回流比的影响及其选择·····	(333)
六、简捷法求理论板数·····	(337)
七、实际板层数与塔效率·····	(339)
八、塔径与塔高的计算·····	(341)
第四节 间歇蒸馏·····	(345)
一、简单蒸馏的原理及计算·····	(345)
二、间歇精馏·····	(346)
第五节 特殊蒸馏·····	(349)
一、恒沸蒸馏·····	(350)
二、萃取蒸馏·····	(353)
三、水蒸气蒸馏·····	(354)
第六节 塔设备·····	(356)
一、精馏操作对塔设备的要求·····	(356)
二、常用板式塔类型·····	(356)
三、浮阀塔设计·····	(358)
第九章 固体干燥·····	(374)
第一节 概述·····	(374)
第二节 湿空气的性质和湿焐图·····	(375)
一、湿空气的性质·····	(375)
二、湿空气的湿焐图及用法·····	(382)
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算·····	(386)
一、物料衡算·····	(387)
二、热量衡算·····	(390)
三、干燥器出口空气状态的确定·····	(393)
四、干燥器的热效率·····	(397)
第四节 干燥速率及干燥时间·····	(398)
一、物料中水分的性质·····	(398)
二、干燥曲线与干燥速率曲线·····	(400)
三、恒定干燥条件下干燥时间的计算·····	(403)
第五节 干燥器·····	(406)
一、厢式干燥器·····	(407)
二、气流干燥器·····	(408)
三、流化床干燥器·····	(412)
四、转筒干燥器·····	(414)
五、喷雾干燥器·····	(416)
六、滚筒干燥器·····	(418)
七、真空耙式干燥器·····	(419)
八、冷冻干燥器·····	(419)

九、干燥器的选型	(420)
第六节 干燥器设计举例	(421)
一、干燥操作条件的确定	(421)
二、气流干燥器的设计	(423)
附录	(432)
附录一 单位换算表	(432)
附录二 各种重要数据	(439)
附录三 管内各种流体和流速	(463)
附录四 管子规格 (摘录)	(463)
附录五 壁面污垢的热阻 (污垢系数)	(466)
附录六 标准筛目	(467)
附录七 泵规格 (摘录)	(468)
附录八 4-72-11 型离心通风机规格 (摘录)	(473)
附录九 管板式热交换器系列标准 (摘录)	(474)

绪 论

绪 论

一、本课程的内容、性质和任务

化学工业（包括制药工业）生产是以化学变化或化学处理为主要特征的工业生产过程，其原料来源广泛，加工过程复杂多样。但是，在各种加工过程中，除化学反应外，其余步骤皆可归纳为若干种基本的物理过程，如流体的输送与压缩、沉降、过滤、传热、蒸发、结晶、冷冻、吸收、蒸馏、萃取、干燥等。这些基本的物理过程称为单元操作。若干单元操作与反应过程串联组合则可构成一个工艺制造过程。

单元操作在化学工业中占有重要地位。不同工艺中的同一种单元操作，具有共同的基本原理和通用的典型设备，如制药工业中葡萄糖水溶液的浓缩与制碱工业中苛性钠溶液的浓缩，都是通过蒸发这一单元操作而实现的，它们共同遵循热交换原理并且都采用蒸发器。

进一步研究发现，这十几种单元操作，遵循着几个基本的规律，从而可进一步将它们归纳成如下几个基本过程：

1. 动量传递过程

研究流体流动的基本规律以及主要受这些基本规律支配的一些单元操作，如流体的输送与压缩、沉降、过滤等。

2. 热量传递过程

简称传热过程，研究传热的基本规律及主要受这些规律支配的一些单元操作，如传热、蒸发、结晶等。

3. 质量传递过程

简称传质过程，研究物质通过相界面之迁移过程的基本规律及受这些规律支配的一些单元操作，如吸收、蒸馏、萃取、干燥等。

4. 热力学过程

研究热力学的基本规律及遵循这些规律的单元操作，如冷冻及深度冷冻等。关于热力学在物理化学课程中有较详细的阐述，为了减少篇幅，本书不介绍冷冻这一单元操作。

《化工原理》是在高等数学、物理学及物理化学等课程的基础上开设的一门技术基础课程，其主要任务是通过学习上述内容研究化工单元操作的基本原理、典型设备的构

造及工艺尺寸的计算（或选型），从而培养学生分析和解决有关单元操作各种问题的能力，以便在制药生产、科研和设计工作中达到强化生产过程、提高设备生产能力及效率、降低设备投资及产品成本、节约能耗、防止污染、加速新技术开发、提高科研及设计水平等方面的目的。

二、基本的研究方法

在研究各种单元操作时，为了弄清过程始末和过程之中各股物料的数量、组成之间的关系及搞清过程中吸收或释放的能量，必须做出物料衡算及能量衡算。物料衡算及能量衡算是本课程研究问题的常用手段。此外，为了计算所需设备的工艺尺寸，必须依赖平衡关系，了解过程进行的方向与极限，依赖速率关系分析过程进行的快慢。这些基本关系是我们从工程观点出发分析某个过程技术上的可行性和经济上的合理性的基本依据。

1. 质量守恒

这是宇宙间一切事物必须遵循的共同规律。在制药、化工生产过程中，随着过程的进行，物质在不断地起着变化，但在一个固定的系统或固定的设备内，必须符合：

$$G_{\lambda} = G_{\text{出}} + G_{\text{损}} \quad (1)$$

式中：

G_{λ} ——输入的物质料量；

$G_{\text{出}}$ ——输出的物质料量；

$G_{\text{损}}$ ——物质的损失量。

按照这一规律进行的计算，称为物料衡算。物料衡算的计算式看上去很简单，但在化工、制药等生产中却起着十分重要的作用。本课程的一些重要内容或计算式，多是以物料衡算为基础而导出的，充分说明掌握质量守恒这一基本规律的重要性。

2. 能量守恒

能量守恒同样是宇宙间的一条根本规律。在化工、制药生产中，除了物质的变化，还经常伴随着能量的转换。例如，在流体流动和输送过程中，存在着流体的位能、动能、静压能和外加机械能的转换问题。在热量传递过程和质量传递过程中，也存在着冷热流体之间以及和环境之间的热量交换问题。根据能量守恒定律，在任何一个系统中：

$$Q_{\lambda} = Q_{\text{出}} + Q_{\text{损}} \quad (2)$$

式中：

Q_{λ} ——输入的能量；

$Q_{\text{出}}$ ——输出的能量；

$Q_{\text{损}}$ ——能量损失。

按照这一规律进行的计算，称为能量衡算。在化工、制药生产中，能量衡算可以帮助我们选择最佳的生产条件，检验能量的消耗程度，制定经济而合理的能量消耗方案，确定能量综合利用的途径等。

3. 平衡关系

任何过程都是变化着的，在一定条件下由不平衡到平衡，平衡状态是过程变化的极

限。以食盐溶解为例，在一定的温度和一定量的溶剂中，所投入的食盐在溶液中溶解，直至达到饱和为止。这时，从溶解与结晶这两个单一的过程来看，过程并没有终止，两者处于动平衡状态；当冷热流体最终的温度相等时，两种流体之间的传热过程也就不再进行。这些都说明一个过程在一定条件下能否进行，以及进行到什么程度，只有通过平衡关系来判断，平衡关系是我们这个学科讨论的许多过程的基本规律之一。

4. 过程速率

平衡关系只说明过程的方向和极限，而过程进行的快慢在工程上是比平衡关系更为重要的问题。我们把单位时间里各种过程在进行中的某种变化量称为过程的速率。显然，过程的速率越高，设备生产能力越大，在同样产量的情况下，设备的尺寸越小，这是工业生产上很关心的问题。过程的速率可用如下的基本关系表示：

$$U = \frac{\Delta}{R} \quad (3)$$

式中：

U ——过程的速率；

Δ ——过程的推动力；

R ——过程的阻力。

过程的推动力是过程在某一瞬间的状态因素与平衡状态因素的差额。在流体流动过程中，它表现为总压强差；在传热过程中它是冷热流体间的温度差；在传质过程中，它是物质的浓度差。构成过程阻力的因素很多，而且同样是因过程性质的不同而不同。从这一基本的关系式可看出，提高过程速率的途径在于加大过程的推动力和减少过程的阻力，在学习本课程时，这是一个应该注意的重要概念。

三、单位制和单位换算

1. 基本量和导出量

影响化工过程的因素很多，但基本上可以概括为两个方面：一是物料的物理性质，如密度、粘度、比热、导热系数等；二是过程的参变量，如温度、压强、速度等。这些物理性质和参变量，在过程中均需要计量和控制，通常把它们统称为物理量。

尽管物理量的种类很多，但它们都可以通过几个彼此独立的基本量来表示，例如长度（单位为米）、质量（单位为千克）、时间（单位为秒）等。其他一些物理量则可以用这些基本量来表示，如速度为路程和时间的比，由长度和时间导出，单位为米/秒，把这种由基本量导出的量称为导出量。

基本量所用的单位称为基本单位，由基本单位导出的单位称为导出单位。

2. 单位制

由于计量各个物理量时，采用了不同的基本量，因而产生了不同的单位制度。目前最常用的单位制有以下三种：

(1) 绝对单位制 以长度（单位为厘米，符号为 cm）、质量（单位为克，符号为 g）、时间（单位为秒，符号为 s）为基本量，亦称 cgs 制。由于厘米和克的量太小，故有时以米（m）、千克（kg）、秒（s）为基本单位，此称为绝对实用单位制或 MKS 制。

绝对单位制在自然科学领域里，尤其是一些早期的物化手册中广泛采用，所以又称之为物理单位制。

(2) 工程单位制 以长度（单位为米）、力 [单位为千克（力）]、时间（单位为秒）为基本量。它是各种单位制中唯一不用质量，而把力作为基本量的制度。质量作为导出量可以根据力 = 质量 × 重力加速度，导出其单位为 [千克（力）·秒²/米]。为简化起见，常用千克（质）表示工程单位制中的质量。

(3) 国际单位制 它是早在 1948 年提出来的一种新单位制。1960 年第 11 届国际计量大会上正式通过为国际单位制，代号为 SI。它是由 MKS 制发展起来的，一共采用七个物理量的单位为基本单位，其名称、符号见表 1。

一些化工、制药工程常用物理量的 SI 单位列于表 2。

表 1 国际单位制的七个基本量

基 本 量	单 位 名 称	单 位 符 号	
		中 文	国 际
长度	米	米	m
质量	千克（公斤）	千克（公斤）	kg
时间	秒	秒	s
电流	安培	安	A
热力学温度	开尔文	开	K*
物质的量	摩尔	摩	mol
光强度	坎德拉	坎	cd

注：* 也使用按式 $t = T - 273.15\text{K}$ 所得的摄氏温度，式中 t 为摄氏温度， T 为热力学温度，摄氏温度用摄氏度符号℃表示。

表 2 工程常用物理量的 SI 单位

物 理 量	国 际 单 位 制 (SI)			
	名 称	符 号		用基本单位表示的关系式
		中 文	国 际	
力	牛顿	牛	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
压力（压强）	帕斯卡	帕	Pa	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
能、功	焦耳	焦	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热量	焦耳	焦	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
功率	瓦特	瓦	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
密度	千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³	$\text{m}^{-3} \text{kg}$
粘度	帕斯卡秒	帕·秒	Pa·s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力矩	牛顿米	牛·米	N·m	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面张力	牛顿每米	牛/米	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热容、熵	焦耳每开尔文	焦/开	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

续表

物理量	国际单位制 (SI)			
	名称	符号		用基本单位表示的关系式
		中文	国际	
比热容、比嫡	焦耳每千克开尔文	焦/(千克·开)	J/(kg·K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
扩散系数	平方米每秒	米 ² /秒	m ² /s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
导热系数	瓦特每米开尔文	瓦/(米·开)	W/(m·K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
传热系数	瓦特每平方米开尔文	瓦/(米 ² ·开)	W/(m ² ·K)	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

为了使用的方便，它还规定了一套词冠来表示单位的倍数和分数，详见表 3。

表 3 国际单位制主要词冠

因数	词冠	符号		因数	词冠	符号		因数	词冠	符号	
		中文	国际			中文	国际			中文	国际
10 ⁹	吉咖	吉	G	10 ¹	十	十	da	10 ⁻³	毫	毫	m
10 ⁶	兆	兆	M	10 ⁻¹	分	分	d	10 ⁻⁶	微	微	μ
10 ³	千	千	k	10 ⁻²	厘	厘	c	10 ⁻⁹	纳诺	纳	n
10 ²	百	百	h								

注：10⁹ 以上与 10⁻⁹ 以下词冠从略。

考虑到有一些单位使用起来比较方便和实用，虽不属于国际单位，但允许与国际单位并用，这些与国际单位并用的单位列于表 4。除表 4 所列者外，还有标准大气压与巴暂时与国际单位制并用。

1 标准大气压，1atm=101 325 帕 (Pa)；

1 巴，1bar=0.1 兆帕=10⁵ 帕 (Pa)。

国际单位制之所以被作为国际上通用的一种单位制度，是因为它有如下的优点：一是各科技部门所用的所有计量单位都可以从上述七个基本单位导出，即可以采用一套共同的单位；二是任何导出单位由基本单位相乘、相除而导出时，都不引入比例常数，或者说比例常数都等于 1。例如能量、热、功三者的单位都采用焦耳 (J)，1J=1N×1m=1N·m。而工程单位制中则用 [卡] (cal) 或 [千卡] (kcal) 作热的单位，采用焦耳 (J) 或 [千克 (力)·米] 作为功或能量的单位，从热的单位转换为功的单位要通过所谓“热功当量”这个比例常数，即 1 [千卡] = 4.187kJ = 427 [千克 (力)·米]。因此，国际单位制使运算简便，且不易发生错误。

表 4 与国际制单位并用的单位

名称	符号		相当于国际制单位的值	名称	符号		相当于国际制单位的值
	中文	国际			中文	国际	
分	分	min	1 分=60 秒	分	分	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) 弧度
小时	时	h	1 时=60 分=3 600 秒	秒	秒	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) 弧度
日	日	d	1 日=24 时=86 400 秒	升	升	L	1 升=1 分米 ³ =10 ⁻³ 米 ³
度	度	°	1° = (π/180) 弧度	吨	吨	t	1 吨=10 ³ 千克